

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU**

**FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**



# ***Mémoire de fin d'études***

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en Génie mécanique

Option : Energétique

**Intitulé du sujet**

**Conception d'un four industriel à  
gaz pour la fusion des canettes en  
Aluminium**

Proposé et dirigé par :

**Pr. ZAZI Nacer**

Devant le jury:

**Mr. SALHI Ahmed**

**Mr. KERKADI Samir**

Présenté par :

**MAHOUCHE Celina**

UMMTO

UMMTO

President

Examineur

***Promotion : 2020/2021***

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU**

**FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**



# ***Mémoire de fin d'études***

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en Génie mécanique

Option : Energétique

**Intitulé du sujet**

**Conception d'un four industriel à  
gaz pour la fusion des canettes en  
Aluminium**

Proposé et dirigé par :

**Pr. ZAZI Nacer**

Devant le jury:

**Mr. SALHI Ahmed**

**Mr. KERKADI Samir**

Présenté par :

**MAHOUCHE Celina**

UMMTO

UMMTO

President

Examineur

***Promotion : 2020/2021***



## Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Dieu, notre créateur,  
pour le courage et la patience qu'il m'a donné  
pour accomplir ce travail.

La profonde gratitude et reconnaissance  
à mon Directeur de mémoire

**Pr ZAZI NACER** pour son effort, ses conseils,  
avertis et sa disponibilité.

Les vifs remerciements aux messieurs les membres  
du jury qui ont accepté de juger ce modeste travail.

Je remercie également tous les enseignants  
du département GENIE MECANIQUE.

Mes remerciements vont à tous ceux qui ont une  
empreinte dans ce travail.

**Merci à tous**





Dédicaces

*Je dédié ce modeste travail :*

*À la mémoire de mon très cher père*

*Ma très chère mère qui a été à mes côtés et m'a  
soutenu durant toute ma vie, que Dieu puisse  
m'aider à l'honorer, la servir et la combler*

*À tous ceux que j'aime et qui m'aiment*

*À mon très cher frère MASSI*

*À mes très chères sœurs*

*FARIDA et son époux HAMID et ses filles*

*LEATISSIA et MIRALE*

*YASMINA et son époux YUCEF et ses enfants*

*SAMY ET MAYA*

*CELIA et son époux MOUMOUH et sa fille*

*DJURA*

*DYHIA et son époux TAHAR*

*À toute ma famille*

*À tous mes amis et amies*

*À tous mes collègues du Département de Génie Mécanique*

*À tous ceux qui ont contribué, de toute manière  
que se soit.*

CELINA



# Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	i
<b>Chapitre I : L'aluminium, ses alliages et sa fusion</b> .....	1
I.1 Introduction .....	2
I.2 La production de l'aluminium .....	3
I.2.1 Extraction de la bauxite .....	4
I.2.2 Production de l'alumine .....	4
I.2.3 Obtention de l'Aluminium .....	5
I.3 Les caractéristiques et propriétés de l'aluminium .....	5
I.3.1 La légèreté .....	5
I.3.2 La conductivité thermique .....	5
I.3.3 La conductivité électrique .....	6
I.3.4 La tenue à la corrosion .....	6
I.3.5 La facilité de mise en œuvre .....	7
I.4 Les alliages de l'aluminium et leurs utilisations .....	7
I.4.1 Constitution des alliages d'Aluminium .....	9
I.4.1.1 Éléments d'alliages .....	9
I.4.1.2 Éléments d'addition .....	9
I.4.1.3 Impuretés .....	10
I.5 Etude de l'alumine .....	10
I.5.1 L'intérêt industriel .....	10
I.4 La fabrication de la canette en aluminium .....	11
I.7 Le recyclage des alliages d'aluminium .....	12
I.7.1 L'affinage .....	13
I.7.2 La récupération des chutes neuves d'industrie .....	13
I.3 Conclusion .....	14
<b>Chapitre II : Cycles thermiques des métaux et alliages</b> .....	15
II.1 Introduction .....	16
II.2 Techniques de chauffage et fusion des métaux et alliages .....	17
II.2.1 Chauffage électrique .....	17
II.2.1.1 Chauffage par induction magnétique .....	17
II.2.1.2 Chauffage par micro-onde électromagnétique .....	20
II.2.2 Chauffage à combustible .....	20
II.2.2.1 Combustible solide .....	20
II.3 Types de chauffage .....	23

# Sommaire

II.3.1	Chauffage direct .....	23
II.3.1.1	Four à résistances électriques .....	23
II.3.1.2	Les brûleurs .....	25
II.3.2	Chauffage indirect .....	26
II.3.2.1	Les tubes radiants .....	26
II.4	Types de fours .....	29
II.4.1	Les fours continus.....	29
➤	Four continue à tapis.....	30
II.4.2	Les fours discontinus .....	30
II.5	Types d'atmosphère du four.....	31
II.5.1	Effet d'atmosphère de four sur la charge .....	32
II.5.2	Atmosphère pour le chauffage direct .....	32
II.5.3	Atmosphère pour le chauffage indirect .....	33
II.5.3.1	Réaction endothermique.....	33
II.5.3.2	Réaction exothermique .....	34
II.5.3.3	Le gaz neutre .....	34
<b>Chapitre III</b>	<b>La combustion dans les fours à gaz.....</b>	<b>17</b>
III.1	Introduction .....	36
III.2	La combustion.....	37
III.3	Les combustibles .....	39
III.3.1	Les différentes catégories de combustibles .....	40
III.4	Les comburants .....	40
III.5	Triangle du feu .....	41
III.5.1	Un combustible (le réducteur) .....	41
III.5.2	Un comburant (oxydant) .....	41
III.5.3	Une énergie d'activation .....	41
III.6	Les Différents types de combustion .....	42
III.6.1	La combustion neutre.....	42
III.6.2	Combustion rapide .....	43
III.6.3	Combustion lente .....	43
III.6.4	Combustion incomplète (en défaut d'air ou avec excès de combustible) .....	43
III.6.5	La combustion avec excès d'air .....	43
III.7	La différence entre la combustion prémélangée et non prémélangée .....	44
III.7.1	La combustion prémélangée .....	44

## Sommaire

III.7.2	La combustion non-premélangée.....	44
III.8	Les instabilités de combustion .....	44
III.9	Les flammes de combustions .....	45
III.9.1	Définition d'une flamme .....	45
III.9.2	Paramètres et caractérisations d'une flamme .....	46
III.9.3	LES DIFFÉRENTS TYPES DE FLAMMES.....	46
III.9.3.1	La flamme premélangée.....	46
III.9.3.2	La flamme non premélangée.....	47
III.10	Le pouvoir calorifique (PCI et PCS) .....	48
III.10.1	Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) .....	48
III.10.2	Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) .....	48
III.11	Rendement de combustion .....	48
III.12	Bilan thermique de combustion.....	49
III.12.1	Calcul le pouvoir calorifique inferieur (PCI) du gaz naturel.....	49
<b>Chapitre IV : Le transfert de chaleur dans les fours.....</b>		<b>50</b>
IV.1	Introduction .....	51
IV.2	Transmission globale de la chaleur dans les fours .....	52
IV.3	Modes du transfert de la chaleur .....	53
IV.3.1	Transferts radiatifs .....	53
IV.3.2	Transferts conductifs.....	54
IV.2	Transferts convectifs .....	54
	• La convection naturelle (convection libre).....	55
	• Convection forcée .....	55
<b>Chapitre V : Dimensionnement du four pour le recyclage des canettes en Aluminium ..</b>		<b>57</b>
V.1	Introduction .....	58
V.2	Le choix du type de four .....	59
V.3	Le choix du mode de chauffage du four.....	59
V.4	Le choix de l'atmosphère protectrice .....	60
V.4.1	Composition du gaz neutre .....	61
V.4.1.1	Les avantages du gaz de l'atmosphère contrôlée .....	61
V.4.1.2	Inconvénient du gaz de l'atmosphère contrôlée.....	61
V.5	Isolation des fours industriels .....	61
V.5.1	Matériaux réfractaires.....	61
	a. Les matériaux préculs.....	62

## Sommaire

b. Les matériaux non préformés .....	62
c. Les matériaux fibreux.....	62
V.5.2 Dimensionnement des parois réfractaires .....	63
V.6 Dimensions de la charge .....	63
V.6.1 Les dimensions d'une palette.....	63
V.6.1.1 Le volume de la palette .....	64
V.6.1.2 La masse volumique de la palette .....	64
V.6.2 Les dimensions de la charge.....	64
V.6.2.1 Le volume de toute la charge .....	65
V.6.2.2 Le volume de toute la charge après fusion .....	65
V.6.3 La chaleur emmagasinée par la charge à 750°C .....	65
V.7 Les dimensions du creuset .....	66
V.7.1 La chaleur emmagasinée par le creuset .....	66
V.8 Dimensions du four .....	67
V.8.1 Calcul sur les parois du four .....	67
V.8.1.1 Combinaison1.....	67
❖ La chaleur emmagasinée par les parois .....	67
❖ La chaleur perdue par les parois .....	68
❖ La chaleur nécessaire pour les parois du four.....	68
V.8.1.2 Combinaison 2 .....	69
❖ La chaleur emmagasinée par les parois .....	69
❖ La chaleur perdue par les parois .....	70
❖ La chaleur nécessaire pour les parois du four.....	70
V.9 La chaleur emmagasinée par le brasseur .....	71
V.10 La chaleur emmagasinée par les tubes radiants .....	71
V.11 La chaleur emmagasinée par l'atmosphère protectrice .....	71
V.12 La chaleur perdue par les fumées .....	72
V.12.1 Le volume de CO <sub>2</sub> contenu dans la fumée par 1m <sup>3</sup> de combustible .....	72
V.12.2 Le volume de H <sub>2</sub> O contenu dans la fumée .....	72
V.12.3 Le volume de O <sub>2</sub> utilisé .....	73
V.12.4 Le volume de O <sub>2</sub> contenu dans la fumée.....	73
V.12.5 Le volume de N <sub>2</sub> contenu dans la fumée.....	73
V.12.6 Le volume total de la fumée.....	73
V.12.7 Le volume d'air utilisé .....	73

## Sommaire

V.12.8	La température de combustion (température de la flamme) .....	73
V.12.9	La température de la fumée à l'entrée du tube radiant .....	74
V.12.10	La température de la fumée à la sortie du tube radiant .....	75
V.13	Bilan thermique .....	75
V.13.1	La chaleur en entrée.....	75
V.13.2	La chaleur en sortie .....	76
V.13.3	Calcul du diamètre de la conduite d'entrée du gaz naturel.....	76
V.13.4	Calcul du diamètre de la conduite d'entrée d'air.....	77
V.13.5	Calcul du diamètre d'évacuation de la fumée.....	77
V.13.6	Calcul du diamètre de la conduite d'entrée du gaz naturel dans le tube radiant.....	78
V.13.7	Calcul du diamètre de la conduite d'entrée de l'air dans le tube radiant.....	78
V.13.8	Calcul du diamètre de la conduite d'évacuation de la fumée dans le tube radiant .....	78
V.13.9	Calcul du diamètre de la buse du gaz naturel .....	78
V.13.10	Calcul du diamètre de la buse d'air .....	80
V.14	Le rendement de la combustion .....	82
	<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	85

## Liste des figures

Figure 1: Le procédé de production de l'aluminium .....	4
Figure 2: les étapes de fabrication d'une canette en aluminium.....	12
Figure 3: le cycle de vie de l'aluminium recyclé. ....	14
Figure 4: Chauffage d'un métal par induction .....	19
Figure 5: Four à induction. ....	19
Figure 6: représentation schématique d'un four à résistance .....	24
Figure 7: Brûleur .....	26
Figure 8: Tube radiant en forme U .....	27
Figure 9: Tubes radiants en forme W .....	27
Figure 10: Tubes radiants en forme U .....	28
Figure 11: Tube radiant en forme U avec récupérateur incorporé.....	28
Figure 12: Tube radiant équipé d'un brûleur jet.....	28
Figure 13: Le four à tapis .....	29
Figure 14: four à sole mobile .....	30
Figure 15: Le triangle du feu .....	42
Figure 16: La flamme de combustion .....	46
Figure 17: La flamme prémélangée.....	47
Figure 18: La flamme non prémélangée.....	47
Figure 19: schéma de la transmission de chaleur dans un four .....	52
Figure 20: Les dimensions de la palette .....	63
Figure 21: les dimensions de la charge.....	64
Figure 22: les dimensions du creuset.....	66
Figure 23: Parois du four pour la 1 <sup>ère</sup> combinaison .....	67
Figure 24: Parois du four pour la 2 <sup>ème</sup> combinaison .....	69
Figure 25: Le bilan thermique du four .....	83
Figure 26: Le schéma global du four.....	87

## Liste des tableaux

Tableau 1: Principaux éléments d'alliages en fonction de la série et domaine de composition massique .....	8
Tableau 2: Compositions chimiques des charbons et des cokes .....	21
Tableau 3: Pouvoir calorifique et quantité de matières volatils des charbons de quelques pays .....	22
Tableau 4: Pourcentage en volume de la composition des principaux combustibles gazeux.....	49
Tableau 5: Composition en % du combustible et de ses caractéristiques à 25°C.....	60
Tableau 6: La composition du gaz neutre.....	61

## Nomenclature

Symboles	Désignations	Unités
$\rho$	La densité	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$C_p$	Chaleur spécifique massique	[J/kg.K]
PCI	Pouvoir calorifique inferieur	[KJ/m <sup>3</sup> ]
m	Masse	[Kg]
L	Longueur	[m]
l	Largeur	[m]
h	Hauteur	[m]
V	Volume	[m <sup>3</sup> ]
T	Température	[°C]
$\emptyset$	La chaleur	[KJ]
K	Le coefficient d'échange convectif	[w/m <sup>2</sup> .K]
e	L'épaisseur	[m]
$\lambda$	Conductivité thermique	[w/m.k]
S	Surface	[m <sup>2</sup> ]
$\alpha$	Coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance	[w/m <sup>2</sup> .K]
Pc	Pouvoir calorifique	[Kg/m <sup>3</sup> ]
q	Le débit	[m <sup>3</sup> /h]
$v$	Vitesse d'écoulement	[m/s]
D	Diamètre de la conduite	[mm]
P	Pression	[Pa]
P <sub>0</sub>	Pression atmosphérique	[Pa]

# Nomenclature

## Indices :

ch	Charge
p	Palette
f	Fusion
amb	L'ambient
cr	Creuset
cha	chamotte
b1	Brique réfractaire
b2	Brique à feu
a	Acier
p	parois
e	extérieure
i	intérieure
lv	Laine de verre
b	Brasseur
T	Tube radiant
atm	L'atmosphère protectrice
f	Les fumées
a	L'air
e	entrée
s	sortie
gn	Gaz naturel

# Introduction

## Générale

### INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux, les métaux en particulier, jouent un rôle important dans tout développement industriel ou progrès technologique. Face aux exigences de l'industrie moderne, de nombreux projets de recherche sont en cours pour développer d'autres matériaux plus performants et moins chers, tels que les matériaux composites, les céramiques, les polymères, etc..., mais les alliages métalliques occupent toujours une place importante. Car les caractéristiques de ces derniers s'améliorent de jour en jour grâce à la recherche.

L'aluminium est un métal bien connu, car il est présent dans beaucoup d'objets que nous manipulons quotidiennement : canettes, etc... . Par exemple, si nous comparons l'aluminium au cuivre, l'aluminium ressemble à un nouveau métal. La présence de l'aluminium est évidente dans tous les secteurs d'activité économique. Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, la production d'aluminium primaire a été multipliée par plus de 30 et dépasse désormais les 33 millions de tonnes par an. Le succès industriel et commercial de l'aluminium s'explique par ses propriétés physiques et chimiques très intéressantes. Il peut être recyclé indéfiniment sans perdre ses propriétés physico-chimiques. Comparé à l'énergie nécessaire à la fabrication de l'aluminium primaire, le recyclage de l'aluminium permet d'économiser 95 % d'énergie.

Etant donné que l'Algérie est un pays producteur de gaz naturel, nous nous sommes intéressés à la question suivante : est-il possible de construire un four pour recycler les canettes récupérées et répondre au besoin du marché de l'industrie algérienne en aluminium ? Et afin de maîtriser la thermique appliquée aux fours industriels nous avons définie le thème suivant comme thème de notre projet de fin d'étude : Conception d'un four industriel à gaz pour la fusion de canettes d'aluminium à recycler.

Le mémoire est divisé en deux parties et comporte en plus une introduction et une conclusion. La première partie représente une synthèse bibliographique sur les fours industriels en général et les fours industriels fonction au gaz naturel ainsi que l'aluminium et ses alliages, cette partie est divisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre traite de l'aluminium et ses alliages.

Le deuxième chapitre présente un aperçu du cycle thermique des métaux et alliages.

Le troisième chapitre est consacré à la combustion dans les fours.

Le quatrième chapitre est basé sur le transfert de chaleur dans les fours.

La deuxième partie est consacrée aux dimensions du four, choix des matériaux qui constitue ses parois, la sole, la voûte, et le creuset de fusion, ainsi que le choix du type de chauffage. Cette partie se termine par le calcul du bilan thermique afin de déterminer le débit du gaz nécessaire pour produire l'énergie suffisante pour la fusion de 50 kg d'aluminium de cannettes.

# **Chapitre I**

L'aluminium, ses  
alliages et sa fusion

## I.1 Introduction

Fût un temps, l'aluminium est l'élément métallique le plus abondant dans la nature, il n'était utilisé que pour fabriquer des bijoux en raison de son manque de rareté et de sa valeur précieuse. Au fil des années, il a su s'imposer progressivement dans de nombreux domaines, lui permettant de participer à des évolutions technologiques majeures. Ses caractéristiques le rendent très intéressant dans les applications industrielles impliquant des alliages dans les domaines aérospatiaux, l'industrie alimentaire, et le mobilier sportif ou moderne.

Il se classe troisième en abondance dans la croûte terrestre, juste après l'oxygène et le silicium (éléments non métalliques), et se classe premier parmi les métaux. Mais on ne le trouve dans la nature qu'en association avec d'autres éléments, notamment sous forme d'oxydes, car il est très consommateur d'oxygène. Le principal minerai pour l'extraction de l'aluminium est la bauxite. Il contient 40 à 60 % d'alumine hydratée mélangée à de la silice et de l'oxyde de fer. C'est ce dernier qui donne à la bauxite sa couleur rouge caractéristique.

L'aluminium est l'un des principaux composants des alliages communs utilisés dans différentes applications. Lorsqu'il est allié avec des petites quantités d'autres matériaux, il devient essentiel et valable en raison de sa haute résistance spécifique et sa faible densité. Il est classé en tête de la liste des métaux les plus utilisés dans l'industrie d'aujourd'hui. Sa légèreté par rapport à l'acier est l'un de ses principaux atouts. Sa solidité et sa résistance mécanique, bien que légèrement inférieures à celle de l'acier, permettent de l'utiliser dans de nombreuses applications à savoir : l'aérospatial, l'aéronautique, l'automobile, les câbles électriques, l'agroalimentaire, les réacteurs nucléaires et le bâtiment.

La production mondiale de ce métal de première fusion s'est chiffrée à un peu plus de 64,4 millions de tonnes.

Dans ce chapitre, nous recommandons de se concentrer sur cet élément chimique. Nous commencerons par sa production, ses propriétés physiques et chimiques. Ensuite, nous parlerons sur les alliages d'aluminium. Ensuite, nous parlerons sur le recyclage des alliages d'aluminium.

## I.2 La production de l'aluminium [1,2]

L'aluminium n'existe pas sous sa forme pure dans la nature mais constitue environ 8% de l'écorce terrestre sous la forme d'un minéral appelé bauxite que l'on trouve un peu partout sur la planète bien que les principales réserves minières de bauxite présentant une forte concentration d'aluminium se trouvent en Amérique Centrale, en Australie ou en Afrique.

La bauxite est en effet composée d'environ 50% d'aluminium hydraté ainsi que de silice et d'oxyde de fer. C'est donc en travaillant à partir de la bauxite que l'on extrait l'alumine, matériau de base pour la fabrication d'aluminium. Le procédé d'extraction de l'alumine consiste à ajouter de la soude à haute température et à pression élevée à la bauxite. On obtient alors de l'aluminate de sodium exempt d'impuretés que l'on dilue ensuite et que l'on refroidit. Cette seconde étape permet de précipiter l'oxyde d'aluminium hydraté à partir duquel on récupère l'alumine qui se présente sous la forme d'une poudre blanche.

Dans l'industrie de production de l'aluminium, environ 90% de cette alumine sera utilisée pour produire le métal aluminium alors que le reste sera considéré comme de l'aluminium de spécialité et servira à des productions non métallurgiques comme la production de céramiques.

Pour obtenir l'aluminium tel qu'on l'utilise en métallurgie, il convient de transformer l'alumine extraite de la bauxite par le biais de différentes étapes.

On verse ainsi tout d'abord l'alumine dans un bain de cryolite et de sels que l'on chauffe à 960°. Cela permet de dissoudre totalement cette poudre blanche. C'est alors que débute la phase d'électrolyse qui consiste à faire traverser un courant électrique à haute intensité dans la cuve dans laquelle se trouve l'alumine dissoute. L'aluminium, qui est ion positif, se dépose ainsi sur l'électrode négative appelée cathode. L'aluminium s'amasse donc dans le fond de la cuve où il est récupéré régulièrement par une technique de siphonage et sous forme liquide.

Une fois récupéré, cet aluminium liquide est envoyé dans les fonderies pour y être traité et mis en forme.

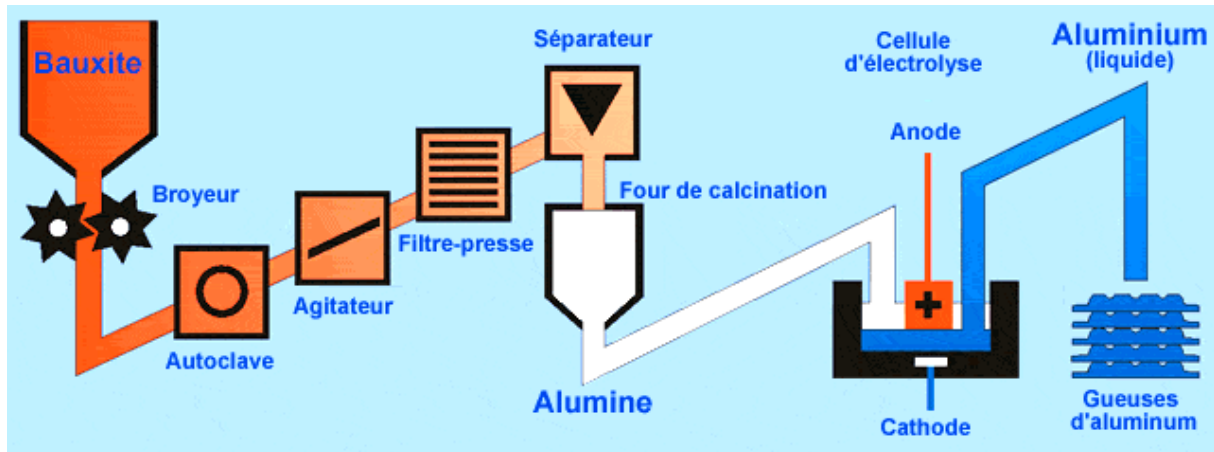


Figure 1: Le procédé de production de l'aluminium

## I.2.1 Extraction de la bauxite

En 1812, Pierre Berthier découvre un morceau d'argile rouge dans la réserve. Nommée bauxite. Celle-ci est uniformément répartie sur la terre. La bauxite est un Argile molle, de densité allant de 2,3 à 2,7, à surface poudreuse.

## I.2.2 Production de l'alumine

La Bauxite calcinée et broyée est attaquée à la soude caustique (NaOH) dans des autoclaves où sous l'action de la pression de 30 à 40 bars est portée à la température allant de 200 à 240°C.

Les autres composants (oxydes de fer et silice) ou « boues rouges » sont éliminés par décantation et filtration. Le liquide transparent restant est constitué d'une solution de soude contenant de l'aluminate de sodium. Puis pompez la solution d'aluminate de sodium obtenue dans le décomposeur 25 à 30 m de haut, on y ajoute du tri-hydraté d'alumine pure très fin pour initier la réaction.

Sous l'effet d'une agitation et d'un refroidissement progressifs, la solution d'alumine précipite le tri-hydrate et forme d'autres cristaux. Ensuite, ils sont séparés de la solution de soude caustique par précipitation et filtration, et la solution de soude caustique est renvoyée dans l'autoclave pour être réutilisée.

L'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  est déshydratée par chauffage à  $1100^\circ\text{C}$  pour éliminer l'eau chimiquement liée (dans le four rotatif) et devient une poudre blanche avec une concentration de 99%.

## I.2.3 Obtention de l'Aluminium

Le procédé le plus couramment utilisé est le procédé « Hall-Héroult », du nom de leurs inventeurs, l'Américain Charles Martin Hall et le Français Paul Héroult. Il dissout l'alumine calcinée dans la cryolite ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) et utilise un courant électrolytique pour faire fondre le mélange entre  $900$  et  $1000^\circ\text{C}$  (Figure 1).

## I.3 Les caractéristiques et propriétés de l'aluminium [3, 4, 5, 6]

L'aluminium et ses alliages occupent encore aujourd'hui une position importante dans divers domaines industriels, en raison de ses propriétés spéciales, de sa facilité de traitement, de sa bonne résistance à la corrosion, de sa faible densité et de son bon rapport de résistance électrique / Poids et haute résistance à la traction, son utilisation augmente de jour en jour.

### I.3.1 La légèreté

L'aluminium appartient à la famille des métaux légers et possède des propriétés mécaniques très élevées. Sa masse molaire est égale à  $27\text{g/mole}$ . C'est l'un des métaux les plus répandus sur terre, dépassant le fer, le cuivre et l'acier qui sont considérés comme les métaux les plus courants, et il est également largement utilisé dans le transport terrestre et maritime rapide, et est de plus en plus utilisé dans l'industrie automobile en raison de sa légèreté son utilisation dans le transport permet l'économie de l'énergie. Bien que cet élément ait une diffusivité élevée (représentant plus de 7 % de la composition lithosphérique), sa présence est trop dispersée en raison de sa forte réactivité, en particulier sa réactivité avec l'oxygène. N'existe pas à l'état natif.

### I.3.2 La conductivité thermique

L'aluminium non allié a une excellente conductivité thermique, environ 60% celle du cuivre. Le point de fusion est de  $660^\circ\text{C}$ , le point d'ébullition est de  $2500^\circ\text{C}$  et la chaleur de

vaporisation est de 10780kJ/kg. C'est pourquoi l'aluminium est utilisé dans des équipements pouvant résister à des températures extrêmes, comme les échangeurs de chaleur. L'aluminium est également utilisé dans les appareils et ustensiles de cuisine en métal. Il existe de nombreuses applications pour les échangeurs de chaleur en aluminium : automobiles, véhicules industriels, climatisation, dessalement, énergie solaire...etc

## I.3.3 La conductivité électrique

La conductivité de l'aluminium est d'environ les deux tiers de celle du cuivre (237 W/m.K à température ambiante). Les matériaux en aluminium sont largement utilisés dans les stations de raccordement des réseaux aériens de haute et moyenne tension.

## I.3.4 La tenue à la corrosion

L'aluminium et ses alliages ont généralement une bonne résistance à la corrosion Atmosphère, océan, ville, industrie. Les architectes utilisent souvent l'aluminium dans les bâtiments publics et les résidences personnelles. Malgré les possibilités de formes et de traitements de surface variés, la structure en aluminium du bâtiment nécessite peu d'entretien et présente une bonne résistance dans le temps. Ce type de bonne résistance à la corrosion combiné à sa faible densité l'a rendu largement utilisé dans l'industrie de la construction.

Le comportement à la corrosion de l'aluminium est influencé par le film d'oxyde, formé à sa surface instantanément, qui assure la protection. Le potentiel qu'on mesure sur l'aluminium n'est pas celui du métal, mais un potentiel mixte entre le film d'oxyde et le métal. Il n'est pas possible de mesurer celui du métal par ce que le film d'oxyde se forme spontanément en fraction de quelque milli seconde lors de la mise en place de ce dernier dans des milieux proches de la neutralité. Malgré que le film d'oxyde soit formé sur toute la surface, il existe toujours une certaine hétérogénéité notamment autour des particules intermétallique. Ce contour devient le siège d'une corrosion par piqûre sur la phase mère, ces particules ont un potentiel souvent cathodique par rapport à la matrice. Sur l'aluminium la corrosion se propage sous forme des piqures dans les milieux proches de la neutralité. La mesure du courant de corrosion donne des indications sur la vitesse globale de corrosion, mais il ne donne pas des renseignements sur ses aspect morphologique : diamètre, densité localisation

des piqûres. Les courbes de polarisation des aciers sont différentes de celle de l'aluminium car cette dernière présente un domaine de passivation.

## I.3.5 La facilité de mise en œuvre

L'alliage d'aluminium est très approprié pour la technologie d'assemblage, telle que : Soudage, boulonnage, rivetage, collage ...etc

La densité de l'aluminium est le tiers de celle de l'acier ou du cuivre, ce qui en fait l'un des matériaux les plus légers du métal sur le marché.

L'aluminium a une température de fusion relativement basse, ce qui se traduit par une fusion facile, ce qui est un avantage certain pour les opérations de fonderie.

## I.4 Les alliages de l'aluminium et leurs utilisations [7,8,9]

L'aluminium peut s'associer à un grand nombre d'autres éléments d'alliages, ce qui donne de nombreux alliages différents, qui ont une très large gamme de propriétés et le rendent adapté à un grand nombre d'applications. Les alliages d'aluminium sont divisés en sept groupes selon les principaux éléments d'alliage, et le huitième groupe est un alliage qui ne peut pas être inclus dans les sept premiers groupes.

Dans chaque groupe, différents alliages ont des caractéristiques communes, mais ont également leurs propres caractéristiques. Le contenu est généralement d'environ quelques pour cent, et il existe des centaines d'alliages commerciaux (Tableau 1).

Les éléments d'alliage les plus courants sont le Magnésium, le Silicium, le Cuivre, le Manganèse et le Zinc, seuls ou en combinaison. Les teneurs sont en général de l'ordre de quelques pourcents (%) Il existe plusieurs centaines d'alliages commerciaux.

L'alliage d'aluminium de fonderie est le plus polyvalent de tous les alliages de fonderie. Ils ont également une grande fluidité et une faible densité qui égale  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . L'aluminium est trois fois plus léger que l'acier. Cette propriété est particulièrement intéressante dans les transports.

Comme alliages de fonderie, ils présentent les caractéristiques suivantes :

- Bonne fluidité pour remplir les sections minces.
- Bas point de fusion comparé à plusieurs autres métaux.
- Transfert de chaleur élevé entre le métal et le moule qui permet un refroidissement plus rapide et des temps de cycle plus courts.
- Stables chimiquement.
- Bon fini de surface avec surface brillante et peu ou pas de défauts.
- La facilité de mise en forme pour la production de boîtes de conserves, de boîtes boissons,...
- La bonne résistance à la corrosion de l'aluminium fait aussi partie de propriétés attractives, déterminantes en milieu marin et appréciée dans de nombreuses applications.

L'alliage est identifié par un numéro à quatre chiffres, dont le premier numéro identifie une série caractérisée par les principaux éléments d'alliage. Il est à noter que la nomenclature adoptée par la série 1XXX (aluminium seul) est différente de la nomenclature des alliages, et son objectif principal est de fournir des informations sur la pureté de l'aluminium. Dans les groupes 2 à 8, le deuxième chiffre de la nomenclature est réservé aux changements continus de la composition chimique des alliages pour améliorer certaines propriétés. Enfin, les deux derniers chiffres indiquent les alliages de la série.

**Tableau 1: Principaux éléments d'alliages en fonction de la série et domaine de composition massique**

Série d'alliages	éléments d'alliages principaux	Domaine de composition (% massique)
1XXX		Al > 99%
2XXX	Cuivre	2-6
3XXX	Manganèse	0,5-1,5

4XXX	Silicium	0,8-1,7
5XXX	Magnésium	0,5-5
6XXX	Magnésium + Silicium	Mg : 0,2 – 1,5 Si : 0,2 – 1,5
7XXX	Zinc + Magnésium	Zn : 5 – 7 Mg : 1 – 2
8XXX	Silicium + Fer	Si : 0,3 – 1 Fe : 0,6 – 2

## I.4.1 Constitution des alliages d'Aluminium

Ils sont constitués d'aluminium (élément de base) et :

- ✓ d'éléments d'alliages;
- ✓ d'éléments d'addition;
- ✓ d'impuretés.

### I.4.1.1 Éléments d'alliages

Leur quantité d'addition est de 1 à 7 % pour les alliages corroyés, et jusqu'à 20 % pour les alliages de moulage. Ces éléments sont Cuivre, le Silicium, le Magnésium, le Manganèse, le Zinc et une combinaison de Mg + Si, Zn + Mg et Zn + Mg + Cu. Certains de ces éléments peuvent être ajoutés en même temps.

### I.4.1.2 Éléments d'addition

Ils sont ajoutés souvent en plus faibles quantités (en générale moins de 1%) pour améliorer certaines propriétés, mais sans changer le groupe d'appartenance, telle que la

finesse des grains, la trempabilité et la soudabilité. Les éléments d'addition classiques sont : le Fer, le Chrome, le Nickel, le Titane, le Plomb et le Bore.

### I.4.1.3 Impuretés

Les impuretés contenues dans ces alliages sont importantes car elles modifient, volontairement ou non, les diverses propriétés du matériau. Le Fer et le Silicium sont les deux principales impuretés, le rapport Fe/Si est environ de 2 % pour la plupart des alliages d'Aluminium.

**Le fer** : c'est une impureté naturelle du silicium et de l'aluminium. Il fragilise la pièce produite par formation de composés intermétalliques durs et fragiles qui peuvent faciliter l'amorçage d'une fissure par décohésion lors d'une sollicitation mécanique. De plus, il gêne l'alimentation en métal liquide des pièces dans le moule par formation de plaquettes d'éléments intermétalliques , Pour avoir de bonnes propriétés mécaniques, sa teneur est limitée 'a moins de 0.14% dans les alliages de première fusion dits a haute pureté ; le chrome et le manganèse ont sensiblement les mêmes effets .

## I.5 Etude de l'alumine

La formule chimique de l'alumine anhydre est  $Al_2O_3$ , oxyde d'aluminium.

On la trouve à l'état naturel dans la bauxite, sous forme hydratée, mélangée à de l'oxyde de fer. On la trouve aussi comme minerai sous forme de corindon ( $\alpha-Al_2O_3$ ).

### I.5.1 L'intérêt industriel [10,11]

L'alumine est un composé très dur, uniquement le diamant et certains produits synthétiques A une dureté plus élevée. A température ambiante, il n'est pas attaqué par les composés courants. Il fond au-dessus de 2000°C. L'alumine très pure peut être utilisée jusqu'à 1700°C. L'étanchéité à l'air atteint 1300°C. La combinaison d'un coefficient thermique élevé, d'une faible dilatation thermique et d'une résistance à la compression élevée offre une bonne résistance aux chocs thermiques. Par conséquent, il est utilisé comme matériau réfractaire, comme pour les revêtements de fours ou de creusets, les tuyaux et les gaines de thermocouple soumis à des chocs thermiques. L'alumine offre également une bonne

isolation électrique et une bonne résistance à l'usure à haute température, ce qui la rend appropriée pour une utilisation comme matériau d'outillage.

On l'utilise donc comme matériau réfractaire, par exemple pour le revêtement de fours ou comme creusets, tubes et gaines de thermocouples soumis à des chocs thermiques.

L'alumine offre également une bonne isolation électrique à température élevée et une bonne résistance à l'usure, ce qui permet de l'utiliser comme matériau d'outillage.

### **I.4 La fabrication de la canette en aluminium [12]**

L'aluminium de base servant à cette fabrication arrive sous forme de lingot qui par la suite passera entre deux laminoirs à une température allant de 455°C à 540°C.

Pour éviter tout chauffage lors de cette opération les rouleaux sont refroidit essentiellement par de l'eau (95% d'eau et 5% d'huile) et continuellement. A chaque passage entre les laminoirs, le lingot devient de plus en plus fin et donc plus long jusqu'à atteindre une épaisseur d'un demi centimètre et une longueur de plus de neuf mètre.

Cette étape de laminage à chaud enfin achevée, la plaque est fin prête à être enroulée sur elle-même pour former une bobine qui à son tour passera au laminage à froid afin de réduire d'avantage son épaisseur.

Les canettes en aluminium sont tellement légères qu'il est difficile de croire qu'elles ne sont autre qu'un produit obtenu à partir d'un énorme rouleau embobinant une feuille d'aluminium extrêmement fine et qui pèse neuf (09) tonnes par lequel on pourra obtenir un nombre de 750000 canettes .



Figure 2: les étapes de fabrication d'une canette en aluminium [13]

## I.7 Le recyclage des alliages d'aluminium [14]

Une grande part de l'aluminium produite chaque année est issue du recyclage qui est aujourd'hui une technique permettant de réduire l'énergie de production de celui-ci, ceci nous permettra d'éviter de consommer les réserves naturelles de bauxite, sans laquelle on ne pourrait plus faire d'aluminium primaire, pour produire de l'aluminium de recyclage nous avons besoin de moins d'énergie que pour la production de l'aluminium d'une première fusion. La quantité d'électricité nécessaire à produire une tonne d'aluminium recyclé ne représente que 5 % seulement de celle utilisée pour obtenir une tonne d'aluminium de première fusion, l'aluminium de recyclage est donc très rentable : l'aluminium usagé a une valeur économique élevée. Cette valeur économique contribue à son recyclage effectif : plus un produit contient d'aluminium, plus il a de chances d'être recyclé.

L'aluminium est 100% recyclable presque à l'infini, sans altération de ses propriétés. Le recyclage de l'aluminium est aujourd'hui une technique permettant de réduire l'énergie de production de celui-ci car on aura moins besoin de matière première et moins d'énergie que pour la production de l'aluminium d'une première fusion. Recycler une tonne d'aluminium requiert vingt fois moins d'énergie que la production d'une tonne d'aluminium primaire.

Le procédé de recyclage est facilement mis en œuvre et permet d'obtenir des produits pouvant conserver majoritairement les qualités initiales du métal ainsi on y gagne de la matière, de l'énergie, une économie et une réduction importante à l'atteinte de l'environnement.

Le procédé de recyclage de l'aluminium est facilement mis en œuvre et permet d'obtenir des produits pouvant conserver majoritairement les qualités initiales du métal ainsi on y gagne de la matière, de l'énergie, une économie et une réduction importante à l'atteinte de l'environnement.

Deux filières distinctes sont utilisées pour le recyclage :

**I.7.1 L'affinage** consiste à refondre, après tri, des déchets, débris, résidus d'aluminium récupérés sur des objets en fin de vie (bâtiment, automobile, emballages...) ou provenant des usines de production et de transformation d'aluminium ;

**I.7.2 La récupération des chutes neuves d'industrie**, provenant de la fabrication ou de l'usinage de produits en alliages d'aluminium, assure aux transformateurs un complément à leur approvisionnement en métal.

Quand on pense aluminium, le premier emballage qui vient à l'esprit est souvent celui des canettes alimentaires. Pas étonnant, puisque ce sont elles qui utilisent le plus d'aluminium.

Le recyclage d'un contenant en aluminium se fait sur un cycle très court. En revanche, jeté dans la nature, l'aluminium mettra environ 500 ans avant de se dégrader.

La collecte de l'aluminium est aujourd'hui bien rodée mais les utilisateurs doivent encore augmenter leurs efforts pour bien le trier. Une fois collecté l'aluminium est acheminé vers un centre de tri en vue de sa valorisation. Un tri est opéré avec un aimant selon le principe du courant de Foucault. De quoi séparer les métaux ferreux et l'aluminium.

L'aluminium est ensuite broyé puis envoyé vers une fonderie qui procède au raffinage et à la fusion. Une fois régénéré, l'aluminium est moulé sous forme de plaques ou de lingots pour être vendu.

Les industriels l'utilisent ensuite comme matière première pour fabriquer de nouveaux produits : cadres de vélos, radiateurs, disques de frein, canettes...et



**Figure 3: le cycle de vie de l'aluminium recyclé.**

## I.3 Conclusion

L'aluminium, qu'il s'agisse d'aluminium pur ou d'un alliage, est l'un des métaux les plus utiles de la planète en raison de sa polyvalence, de sa légèreté, de son faible coût de production et de sa belle apparence. Le poids particulièrement léger offre des opportunités dans les automobiles et le transport.

Le succès de l'industrie de l'aluminium dépend en grande partie de sa capacité à innover et à innover et à se positionner comme un excellent métal dans le domaine du développement durable.

Ces caractéristiques font de ce métal l'un des métaux les plus utilisés au monde, mais parce qu'il y a encore beaucoup de ressources disponibles et peuvent être recyclées presque indéfiniment, son utilisation devrait devenir importante à l'avenir. Toute montre que l'aluminium n'a pas livré tous ses secrets.

L'un des inconvénients de l'aluminium est ses propriétés mécaniques relativement médiocres. Il existe des techniques de durcissement pour les renforcer.

# **Chapitre II**

## Cycles thermiques des métaux et alliages

## II.1 Introduction

Appliquer un cycle thermique un à métal signifie le soumettre à une variation de température en fonction du temps. Ce procédé comprend :

- le chauffage.
- le maintien à une température déterminée.  
Si c'est un traitement thermique on effectue :
- Refroidissement à une vitesse donnée :
  - ❖ lente (dans le four, à l'air).
  - ❖ Plutôt rapide (dans l'huile).
  - ❖ Très rapide (dans l'eau).

Si c'est une fusion on effectue une coulée.

La première étape de chaque cycle thermique consiste à chauffer le métal à la température souhaitée. Le chauffage doit être effectué très rapidement pour obtenir une faible consommation d'énergie et une productivité élevée. Il existe deux possibilités pour le chauffage des métaux :

- Par transmission de la chaleur : il y a trois possibilités :
  - Par conduction : Le métal est chauffé dans un four ordinaire, il ne contacte que la sole du four et ne reçoit qu'une faible quantité de chaleur consommée par conduction.
  - Par convection : Dans ce cas, le métal s'échauffe au contact d'un fluide chaud (gaz ou liquide), qui se déplace et lèche le métal et consomme l'essentiel de la chaleur.
  - Par rayonnement : La chaleur absorbée par les parois et la voûte du four rayonne vers le métal où la chaleur est absorbée. C'est le cas où l'apport de chaleur est le plus important. Dans la plupart des cas, le métal est chauffé simultanément par convection et rayonnement.
- Par production de la chaleur dans le métal :

Le métal peut être chauffé en générant un courant électrique dans cette dernière, soit en utilisant le métal comme conducteur dans un circuit électrique (chauffage par résistance), soit en plaçant le métal dans un champ variable (chauffage par induction).

Cette méthode est principalement utilisée pour les pièces avec des sections transversales petites et uniformes. Une vitesse de chauffe très élevée peut être obtenue. Quelle que soit la méthode de chauffage utilisée, il existe toujours des différences de température dans différentes parties de la pièce. La répartition de la chaleur est inégale (hétérogène).

## **II.2 Techniques de chauffage et fusion des métaux et alliages:**

### **II.2.1 Chauffage électrique**

Le chauffage a toujours été une habitude quotidienne pour tout le monde. En plus d'être une application personnelle et domestique, il a également trouvé une variété d'applications dans l'industrie. Par conséquent, une variété de technologies ont été développées pour répondre à cette demande. L'un d'eux est la technologie du four. Ce dernier se présente sous de nombreuses formes, y compris les fours électriques.

Les fours électriques présentent de grands avantages pour la fusion des métaux, les plus importants étant les suivants :

- Des températures très élevée jusqu'à 3500°C peuvent être obtenues dans certains types de fours électriques.
- La charge est totalement exempte de contamination par le gaz combustible.
- La vitesse de montée en température peut être contrôlée et maintenue dans des limites très précises, avec des régulations entièrement automatiques.
- Son fonctionnement est effectué avec une hygiène supérieure à celle des autres types de fours.

Les types de base de fours électriques sont énumérés ci-dessous ;

#### **II.2.1.1 Chauffage par induction magnétique [15, 16,17]**

Le chauffage par induction est une méthode rapide, efficace, précise et reproductible qui permet de chauffer sans contact les métaux et d'autres matériaux conducteurs électriques. Son avantage est qu'il chauffe le matériau sans contact avec l'énergie. Un système de chauffage par induction comprend une source de courant d'induction qui convertit l'alimentation du secteur en courant alternatif, le transmet à une tête d'induction et à une bobine (ou inducteur)

et crée dans cette dernière un champ électromagnétique. Ce champ induit dans la pièce placée dans la bobine un courant qui provoque l'échauffement de celle-ci.

La bobine, refroidie par eau et relativement froide au toucher, est placée autour de la pièce à chauffer ou à proximité. Elle ne touche pas la pièce : la chaleur est seulement produite par le courant induit dans la pièce.

Cette dernière peut être constituée d'un métal tel que de l'acier, du cuivre, de l'aluminium ou du laiton, ou d'un matériau semi-conducteur comme le carbone, le graphite ou le carbure de silicium. Pour chauffer des matériaux non conducteurs tels que les plastiques ou le verre, l'induction peut être utilisée pour chauffer un matériau conducteur électrique, le plus souvent du graphite, qui communique sa chaleur au matériau non conducteur.

Le chauffage par induction est utilisé pour des processus dans lesquels la température peut aller de 100 °C à 3 000 °C. Il peut servir pour des chauffages de courte durée (moins d'une demi-seconde) comme pour des maintiens en température sur plusieurs mois.

Il est utilisé dans les cuisines individuelles et collectives, dans de nombreuses applications industrielles telles que la fusion, le traitement thermique, le préchauffage avant soudage, le soudage, le brasage dur, le brasage tendre, la polymérisation, le scellement et la rétraction d'emballages plastiques, et aussi dans la recherche et le développement.

Lorsqu'un courant alternatif est appliqué à la bobine d'induction du four, un courant plus important est induit dans le matériau de charge. La résistance du courant induit dans la charge du four fait chauffer la charge jusqu'à ce qu'elle fonde. Une fois le métal fondu, le champ magnétique généré s'agitiera dans le bain de fusion, homogénéisant ainsi la composition chimique et absorbant tous les additifs dans le bain de fusion.



Figure 4: Chauffage d'un métal par induction

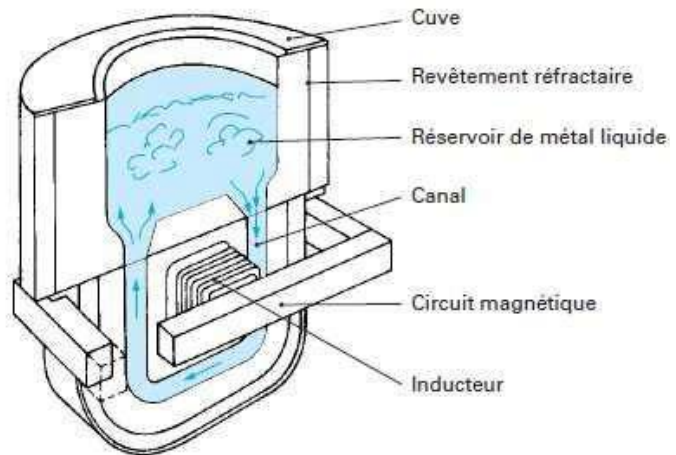


Figure 5: Four à induction.

➤ **Avantages du chauffage par induction** Le chauffage par induction permet :

- D'ajuster précisément la quantité de chaleur à diffuser. La vitesse de transfert de chaleur le long de l'objet est beaucoup plus rapide que la chaleur convective traditionnelle.
- Chauffer les pièces difficiles d'accès telles que les morceaux de métal, encastrés dans du bois, le PVC ou d'autres tôles noyées sous vide.
- Par rapport aux systèmes de chauffage traditionnels, de meilleures conditions de travail sans poussière ni fumée ;
- De réduire les pertes de chaleur et d'émissions, d'obtenir une plus grande rentabilité.

➤ **Inconvénients du chauffage par induction**

- Lors d'une mauvaise manipulation, d'autres objets peuvent être accidentellement chauffés. Afin de résoudre ce problème, utilisez un processus d'émulsion ou de refroidissement à l'eau ;
- Le coût d'acquisition de la forte puissance est élevé ;
- Il peut y avoir des champs électromagnétiques, qui peuvent perturber l'environnement en cas de mauvaise isolation.

**II.2.1.2 Chauffage par micro-onde électromagnétique :**

Le chauffage diélectrique est basé sur le mécanisme de transfert d'énergie des microondes vers le matériau à travers des interactions moléculaires avec le champ électromagnétique (Elloumi 2016). Contrairement aux techniques de chauffage conventionnelles où le matériau est chauffé en premier lieu à la surface puis vers l'intérieur, le chauffage par micro-onde a la particularité de produire la chaleur directement au cœur du matériau ce qui permet un chauffage rapide et uniforme sur toute l'épaisseur du matériau. Le chauffage diélectrique permet notamment de réduire le temps et le coût du traitement et d'économiser la consommation d'énergie. Dans l'industrie, le chauffage par micro-ondes est effectué soit à une fréquence proche de 915 MHz ou 2450 MHz, dans le but d'éviter toute interférence avec les systèmes de télécommunication.

**II.2.2 Chauffage à combustible [18,19]**

Un combustible est une matière qui, en présence d'oxygène et d'énergie, peut se combiner à l'oxygène dans une réaction chimique générant de la chaleur : la combustion. Les combustibles peuvent être de provenance et de nature très variées, ils contiennent en quantités variables des éléments utiles : du carbone et de l'hydrogène et des éléments neutres ou mêmes néfastes : de l'oxygène, de l'azote, du soufre, des minéraux (qui se transforment en cendres). Dans la nature, les combustibles se présentent dans les trois états physiques possibles : solide, liquide et gazeux. Ces différents types de combustibles se distinguent principalement par leur pouvoir calorifique.

**II.2.2.1 Combustible solide**

Les combustibles solides contiennent de la matière organique (C, H, O), peu ou pas de soufre, de l'azote, des minéraux (cendres) et de l'eau en général en quantité non négligeable. Ceux utilisés dans les fours sont : bois (bois déchiqueté, granulés de bois), déchets de bois, charbon de bois; la houille, lignite, anthracite, coke, tourbe ; déchets ménagers et industriels. Ils présentent des caractéristiques chimiques, physiques et thermiques variables. Les formes et caractéristiques variables des solides à brûler requièrent des dispositifs de combustion différents. En général nous avons le foyer mécanique le foyer à brûleurs.

Exemples de combustibles solides : Bois, Charbon (composition C, H, O, N, S variable), Anthracite (92 à 94% de carbone), Houille (75 à 85% de carbone), Lignite (67 à 74% de carbone), Tourbe (55 à 65% de carbone), autres...

➤ Types de combustibles solides

On cite deux principales matières de combustibles solides : les charbons et les cokes. Le Tableau ci-dessous (Tableau 1) illustre les gammes de compositions des charbons et des cokes.

**Tableau 2: Compositions chimiques des charbons et des cokes**

Combustibles	C	H	O	N	S	A
Charbon	68-85	3,5-5,5	0,5-6	1-3	0,2-3	5-20
Coke	85-92	3,5-5,5	0,3	1-2	3-6	0,5-2

Le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) des combustibles solides est donné par la formule de DULONG :  $PCI \left( \frac{Kcal}{Kg} \right) = 78,3c + 287(h - \frac{o}{8}) + 22s$  Dont : c, h, o, s sont les pourcentages massiques du carbone, hydrogène, oxygène et soufre, respectivement, dans le combustible solide, et les chiffres sont les chaleurs spécifiques de chaque élément.

Le pouvoir calorifique des combustibles solides varie de 6000 à 8500 Kcal/Kg, selon son origine et sa composition chimique, avec 30% environ de matière volatile.

Le Tableau ci-dessous (Tableau 2) présente les valeurs de ces deux paramètres (PCI et % matières volatiles) de charbons de différentes origines.

**Tableau 3: Pouvoir calorifique et quantité de matières volatiles des charbons de quelques pays**

Origine	Matières volatiles (%)	PCI ( $Kcal/Kg$ )
Afrique du sud	25	6750
Australie	17	7300
Pologne	35	7400
France	15	7100

➤ **Température d'inflammation des combustibles solides**

La température d'inflammation d'un combustible solide est la valeur de température en surface des grains à laquelle le combustible sera autoentretenu en combustion. Pour porter le combustible à sa température d'inflammation, il faut chauffer pour une durée appelée « temps d'inflammation ». Cette durée d'inflammation est une fonction de la nature du combustible et de sa surface spécifique. La nouvelle technologie de l'utilisation du charbon à l'échelle industrielle est son emploi sous forme de charbon pulvérisé. Il est préparé par broyage dans des broyeurs analogues à ceux utilisés pour les matières premières. Le charbon pulvérisé est introduit dans les brûleurs des fours à une granulométrie inférieure à 15 mm de diamètre de grains, dont généralement entre 85 à 90% de la masse est de diamètre inférieur à 0,09 mm (soit moins de 90  $\mu m$ ). A cette granulométrie il est injecté dans des brûleurs complexes des fours industriels. Son injection est une opération très délicate et demande une très grande vigilance technique car un mélange de 150 à 1500  $g/m^3$  de poussière de charbon avec un volume suffisant en oxygène peut conduire à l'explosion (la déflagration).

**II.2.2.2 Combustible liquide**

Les combustibles liquides, voire gazeux, proviennent généralement du pétrole, qui est un mélange d'hydrocarbures, c'est-à-dire de composés à base de carbone C et d'hydrogène H,

auxquels s'ajoutent essentiellement du soufre S, de l'oxygène O et de l'azote N. Exemples de combustibles liquides: mazout, fuel, hydrocarbures saturés  $C_nH_m$ , S, N, O, autres...

### **II.2.2.3 Combustible gazeux**

Il y en a de deux types : ceux d'origine naturelle les hydrocarbures naturels et ceux artificiels tels que les gaz de haut fourneau, les gaz de gazogènes, les gaz de cokerie etc. Généralement les combustibles gazeux sont peu utilisés seuls ; de nos jours les foyers sont équipés de brûleurs mixtes (fuel-gaz, fuel-gaz-charbon pulvérisés pour ne citer que ceux là). Cette pratique permet de pouvoir utiliser selon la conjoncture économique des combustibles différents.

Exemples de combustibles gazeux: méthane  $CH_4$ , propane  $C_3H_8$ , butane  $C_4H_{10}$ , gaz de Lacq ( $CH_4$  95.4%,  $C_2H_6$  3.4%, autres 0.8%,  $N_2$  0.4%), autres...

## **II.3 Types de chauffage**

### **II.3.1 Chauffage direct**

Dans les fours à chauffage direct, il y a contact entre les gaz issus de la combustion et les produits à chauffer. Du point de vue thermique, cela entraîne qu'une partie du transfert de chaleur s'effectue par convection.

#### **II.3.1.1 Four à résistances électriques [20]**

Dans le chauffage direct par résistance, le courant s'écoule directement à travers la substance à chauffer. La substance qui doit être chauffée dans un système de chauffage électrique appelée charge. Comme ici la charge elle-même fournit le chemin de passage du courant et que la charge produit de la chaleur, l'efficacité du système est assez élevée. Les exemples populaires de chauffage direct par résistance sont le soudage par résistance et la chaudière à électrodes.

#### **➤ Principe de fonctionnement des fours à résistances**

La puissance électrique  $P$  (W) dissipée dans l'élément chauffant de résistance  $R$  ( $\Omega$ ) est transformée en chaleur par effet joule; elle s'exprime par la loi de Joule :

$$P = U.I = R.I^2 = \frac{U^2}{R}$$

Avec U(V) et I(A) respectivement les valeurs efficaces de la tension aux bornes de la résistance et du courant électrique qui la traverse. Dans la pratique, les résistances électriques utilisées de manière classique ont une réactance faible devant R (cos φ voisin de 1)

Caractéristiques des fours à résistances Un four à résistances est essentiellement constitué (figure 1) :

- d'une enceinte (laboratoire ou chambre de chauffe) réalisée à partir de matériaux à caractère isolant ou réfractaires dont le rôle est de réduire les pertes thermiques par transmission vers l'extérieur ;
- de résistances électriques disposées en voûte, en sole ou sur les parois latérales (pariétales) de l'enceinte. Leur alimentation est assurée soit directement par le réseau, soit par l'intermédiaire d'un ou plusieurs transformateurs ; un système de modulation de la puissance y est associé, piloté par un système de régulation de température ;
- de la charge à traiter, caractérisée par sa forme, sa nature et sa température initiale.

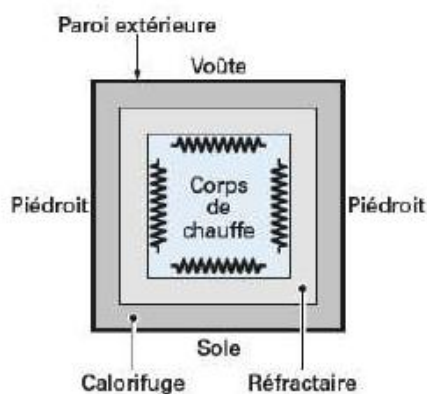


Figure 6: représentation schématique d'un four à résistance

➤ Différents types de fours électriques à résistances

Plusieurs types de fours électriques à résistances sont connus. Prenant tous source dans le principe de base des fours électriques, ces différents types ne diffèrent que sur la base de la

forme ou du mécanisme intégré dans leurs enceintes (positionnement des résistances dans l'enceinte...). Ainsi nous avons :

- Fours à sole ;
- Fours à cloche,
- Fours à plateau tournant ;
- Fours à chaînes et à convoyeur ;
- Fours continus à tablier, à tapis ou à bande ;
- Fours à wagonnets ;
- Étuves électriques ;
- Fours spéciaux.

### II.3.1.2 Les brûleurs

Le brûleur est un dispositif mécanique qui mélange l'air et le combustible dans des proportions permettant une combustion optimale.

Au cours des dernières années, de grands progrès ont été réalisés sur la combustion. Ces développements ont abouti à des brûleurs de haute technologie qui fournissent un contrôle précis du rapport air/combustible sur toute la plage d'utilisation, conduisant ainsi à une hausse du taux de modulation, un faible accès d'air et une efficacité opérationnelle maximale.

Il est possible de prolonger la durée de vie d'un ancien four industriel en remplaçant le brûleur par un modèle récent. Cela va aussi permettre d'améliorer l'efficacité et la capacité de réduction des émissions.

Le brûleur est constitué de :

- Un dispositif de mélange du combustible et de comburant.
- Une chambre de combustion.
- Un orifice de sortie des produits de combustion achevés.

Le brûleur a pour fonction d'assurer la stabilisation de la combustion de manière à engendrer une source chaude à un potentiel de température à une puissance susceptible de permettre la transmission de la quantité de chaleur désirée vers le produit, à la température voulue.

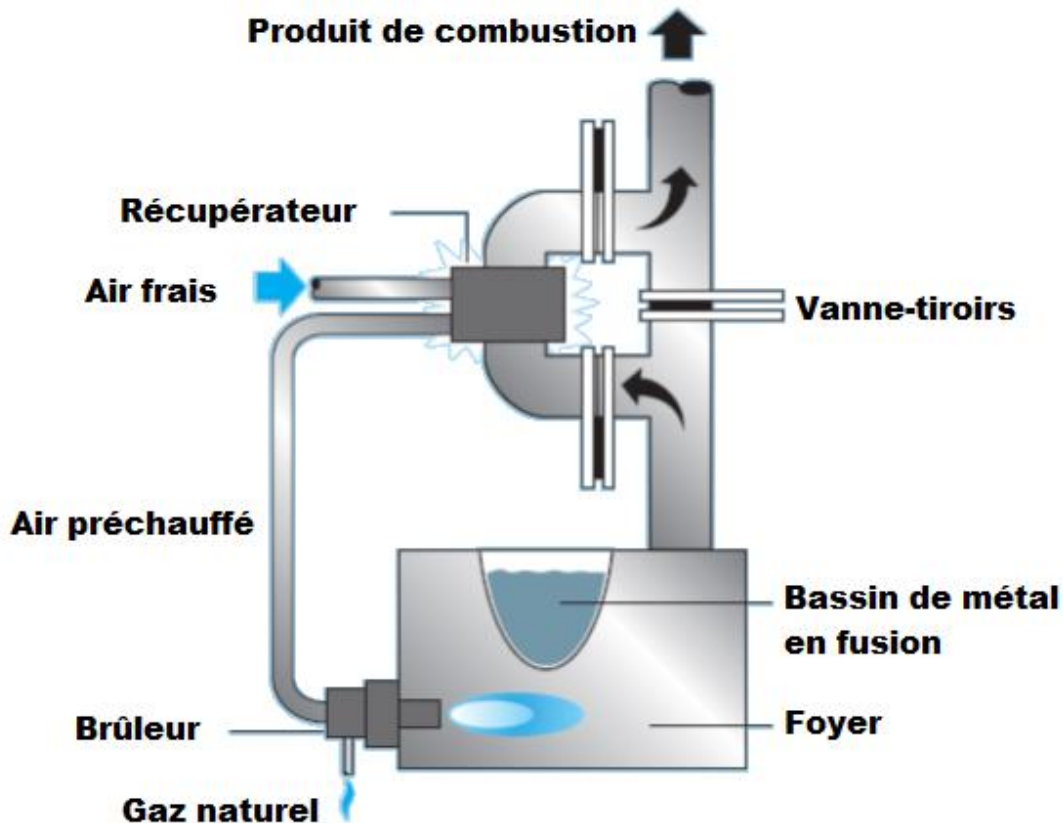


Figure 7: Brûleur

## II.3.2 Chauffage indirect

Au niveau des fours à chauffage indirect, l'interaction entre les gaz de combustion et les produits n'existe plus. Par contre, la combustion du mélange air/gaz s'effectue dans des tubes radiants ou dans des boîtes radiantes. Le transfert de chaleur se fait donc par rayonnement.

### II.3.2.1 Les tubes radiants :

Les tubes radiants sont à haute température de l'environnement de travail en moyenne : 800 -1200 °C, la plupart d'entre eux sont utilisés pour le chauffage indirect au four ; ils sont constitués d'un élément chauffant et d'un brûleur.

Suivant la forme et le mode de fonctionnement des tubes radiants, on peut les classer comme suit :

- Tubes radiants sous forme U simple.
- Tubes radiants sous forme U avec récupérateur incorporé.

- Tubes radiants droit simple.
- Tubes radiants droit avec récupérateur incorporé.
- Tubes radiants sous forme W.

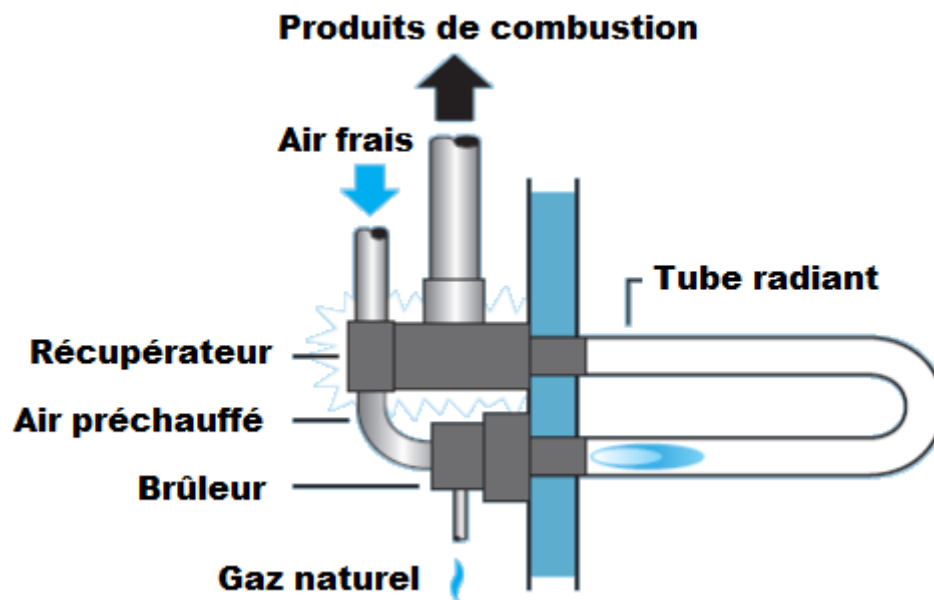


Figure 8: Tube radiant en forme U



Figure 9: Tubes radiants en forme W



Figure 10: Tubes radiants en forme U

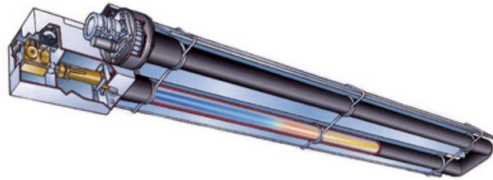


Figure 11: Tube radiant en forme U avec récupérateur incorporé

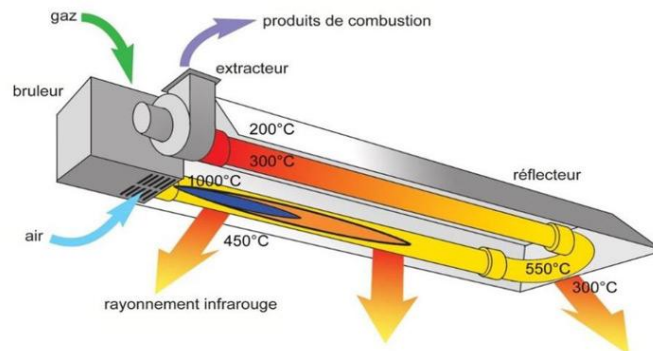


Figure 12: Tube radiant équipé d'un brûleur jet

Pour le four à sole à tubes annulaires (tubes radiants), les tubes entourent le foyer de combustion, puis les chambres de cuisson, en formant une boucle fermée, et transportent la chaleur par l'intermédiaire d'un fluide (eau vapeur ou huile). Ce type de four est classé dans la catégorie four à sole fixe, chauffage indirect.

## II.4 Types de fours

### II.4.1 Les fours continus

Dans un four continu (encore appelé four tunnel ou four à passage), le produit à chauffer entre à une extrémité et en ressort à l'autre, c'est-à-dire que l'enfournement et le défournement sont mis en œuvre pendant le fonctionnement du four.

Dans ce deuxième groupe, les produits à traiter se déplacent de façon continue ou pas à pas depuis l'enfournement jusqu'au défournement. Un four continu fonctionne en régime thermique établi. La charge traverse le four et le cycle de température est réalisé sur la longueur du four au cours de l'avancement de la charge. Chaque section du four est à température constante dans le temps, température qui lui est propre pour un cycle de traitement donné.

Parmi ces fours on cite :

- Les fours à tapis
- Les fours poussant
- Les fours à sole à rouleaux
- Les fours à sole tournants



**Figure 13: Le four à tapis**

➤ **Four continue à tapis**

La charge est véhiculée dans le four par un tapis transporteur qui peut être métallique ou non en fonction des conditions d'utilisation. Les fours à tapis sont extrêmement répandus dans tous secteurs industriels et sont construits dans des gammes de dimensions et de puissance très larges. Dans le cas de productions très importantes la sole du four est munie de rouleaux, commandés ou non, tournant à la vitesse d'avancement du tapis afin de diminuer l'effort de traction de celui-ci. Ces fours sont en particulier utilisés dans les industries mécaniques et métallurgiques pour de nombreux traitements thermiques en continu et le réchauffage avant formage de certains produits, ainsi qu'une construction électrique et électronique pour le traitement de nombreux composants.

## **II.4.2 Les fours discontinus**

Dans un four discontinu, le produit à chauffer est immobile dans le four ; il est chargé et déchargé (enfourné et défourné) au même endroit. Le foyer doit être éteint pendant le déchargement et le rechargement du four. La température en un point donné du four évoluera en fonction du cycle de chauffage que l'on veut faire subir au produit.

Parmi ces fours on cite :

- Fours à sole mobile
- Fours à cloche
- Fours sous vide
- Fours à chambre



**Figure 14: four à sole mobile**

## **II.5 Types d'atmosphère du four**

Aujourd'hui, l'utilisation d'atmosphères gazeuses pour les cycles thermique des métaux est devenue la norme. De plus, les exigences croissantes en termes de qualité et la nécessité de contrôler et de reproduire cette qualité imposent l'utilisation d'atmosphères de qualité de mieux en mieux élaborées et régulées.

Cette tendance a pour conséquence la mise sur le marché de nouvelles solutions de fourniture d'atmosphères et de moyens de contrôles : l'atmosphère est aujourd'hui une composante essentielle du traitement thermique au même titre que la maîtrise des paramètres thermiques.

Les atmosphères gazeuses utilisées dans les fours sont généralement constituées de mélanges de plusieurs gaz ( $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $He$ ) avec des traces d'impuretés ( $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ). Les propriétés globales de ces atmosphères dépendent des caractéristiques intrinsèques des mélanges unitaires et donc de la capacité du fournisseur de l'atmosphère d'en assurer la qualité et la reproductibilité.

Lorsque les pièces sont chauffées jusqu'aux hautes températures dans ces fours, les gaz entrent en réaction avec la surface du métal, ce qui entraîne l'oxydation ou la décarburation des couches superficielles des pièces.

L'oxydation résulte de l'interaction du métal avec l'oxygène ou la vapeur d'eau se trouvant dans le milieu du four.

Dans le cas des traitements thermiques destinés à modifier les propriétés métallurgiques « à cœur » (recuits, revenus, trempes gazeuses), l'atmosphère doit protéger la surface métallique de toute réaction indésirable (telles oxydation, cémentation, décarburation) et doit véhiculer la chaleur entre le métal traité et les parties chaudes (résistances, tubes radiants) et froides (brasseurs, échangeurs, chemises d'eau, zones de trempe) du procédé.

Donc le rôle de l'atmosphère en traitement thermique est de maîtriser les caractéristiques physico-chimiques de la surface des pièces traitées. Ce rôle dépend du type de traitement choisi ainsi que de l'interaction que l'on souhaite avoir entre le gaz et la surface du métal.

## II.5.1 Effet d'atmosphère de four sur la charge

Pendant le processus de traitement thermique, il y a interaction entre la charge et l'atmosphère du four, de ce fait résulte des effets nuisibles (contamination, décarburation) sur la charge à traiter. C'est pourquoi, on choisit des atmosphères convenables de façon à éviter cette interaction.

Ces effets, l'oxydation et la décarburation peuvent, dans certains cas, être inacceptables et l'on pourra être amené :

- soit à rechercher une combustion avec défaut d'air, généralement important : c'est par exemple, le cas des fours dits à chauffage sans oxydation pour le réchauffage des métaux ;
- soit à utiliser un gaz d'atmosphère, élaboré par ailleurs que l'on mettra en contact avec les produits : fours de traitements thermique dits à atmosphère contrôlée qui sont, dans ce cas, obligatoirement à chauffage indirect.

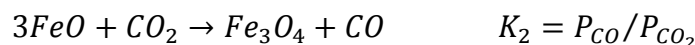
## II.5.2 Atmosphère pour le chauffage direct

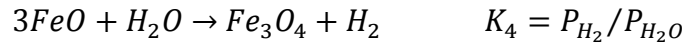
Les fumées sont composées d'éléments oxydants ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ), d'éléments réducteurs ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ) et d'éléments neutres ( $\text{N}_2$ ). Les effets de ces éléments augmentent avec la température.

La composition et la pression partielle de la fumée ainsi que la constante d'équilibre déterminent les réactions entre les fumées et la surface de charge.

La température et la constante d'équilibre sont des paramètres qui déterminent l'oxydation de la charge.

Les réactions suivantes représentent les étapes d'oxydation du fer par les composants de la fumée ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ).





Ces réactions sont irréversibles et tendent toujours vers la droite (augmentation de  $CO$  et  $H_2$ ).

Dans les fours à chauffage direct, l'état d'équilibre n'est jamais atteint à cause de l'apport continu de  $CO_2$  résultant de la combustion.

Par exemple, le cuivre n'est pas oxydé par le  $CO_2$  et l' $H_2O$ , vu la faible valeur de sa constante d'équilibre et du fait que les points d'intersections des températures et des constantes d'équilibres se trouvent au dessus de la droite ( $Cu - Cu_2O$ ). Ces propriétés favorisent l'emploi de  $H_2O$  comme atmosphère protectrice.

Les composants oxydants de la fumée provoquent la décarburation de la surface.

## II.5.3 Atmosphère pour le chauffage indirect

Le procédé du chauffage indirect est utilisé dans le cas où on conçoit d'isoler la charge de la fumée, pour cela on entoure la charge par une atmosphère protectrice artificielle pour éliminer l'effet de l'air.

La composition de l'atmosphère protectrice est liée directement à la composition de l'alliage à traiter et ses propriétés.

Dans le cas de l'aluminium, on utilise une atmosphère protectrice neutre, l'azote pur et sec est une excellente atmosphère de protection contre l'oxydation.

### II.5.3.1 Réaction endothermique [21]

La réaction endothermique est la conversion de l'énergie absorbée. Au cours de la réaction endothermique, l'apport d'énergie est utilisé pour rompre les liaisons présentes dans les réactifs car ces liaisons sont plus fortes que les liaisons du produit. Le système obtient de la chaleur.

**II.5.3.2 Réaction exothermique**

Une réaction exothermique est la conversion de l'énergie libérée. Dans une réaction exothermique, les liaisons présentes dans les réactifs sont plus faibles que les liaisons présentes dans le produit. Le système perd de la chaleur.

Le gaz atmosphérique peut être fourni par un générateur atmosphérique fonctionnant au gaz combustible, ou par du gaz synthétique ou liquide livré sous forme de bouteilles en acier.

Le gaz endothermique est produit par combustion partielle d'un combustible gazeux. La production de ce gaz se fait par production d'une combustion partielle dégageant de l'énergie sous forme de fumée, cette fumée sera transférée dans une cornue, contenant un catalyseur. Puis on chauffe la fumée dans la cornue jusqu'à 1300°C, à laquelle se déroule les réactions endothermiques. Et enfin on refroidit le gaz produit dans un refroidisseur.

Le gaz exothermique est produit d'une combustion partielle d'un combustible gazeux, le produit de la combustion est ramené à une température de 1000°C à 1100°C. Sa composition dépend de :

- la composition du gaz de combustion,
- du rapport du mélange du combustible avec le comburant,
- la température de combustion

Il est constitué de composés oxydants ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ) de composés réducteurs ( $CO$ ,  $H_2$ ) et de composés neutre ( $N_2$ ), parfois il renferme de faibles quantités de  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ...etc.

**II.5.3.3 Le gaz neutre**

Le gaz neutre est principalement composé de 97 % d'azote, ce qui présente l'avantage d'une faible teneur en éléments de décarburation et d'oxydation.

# **Chapitre III**

## **La combustion dans les fours à gaz**

### **III.1 Introduction**

Depuis l'Antiquité, l'homme n'a cessé d'utiliser la combustion. Il utilise le feu pour se nourrir, pour le chauffage et défense. Aujourd'hui, la vie humaine est basée sur la combustion, tout comme elle est basée sur l'air et l'eau. Nos progrès dépendent de plus en plus de la combustion, qui est une partie importante de la production limitée d'énergie fossile.

Cependant, la combustion de ces hydrocarbures (comme le méthane) peut conduire à des espèces polluantes pour l'environnement, et des normes anti-pollution de plus en plus strictes poussent les industriels du secteur de l'énergie à mener des recherches pour améliorer le processus de combustion et réduire la consommation de carburant et limiter les émissions polluantes. En particulier, les oxyde d'azote NOX et le monoxyde de carbone CO.

La combustion est l'un des thèmes privilégiés de l'énergétique. Nous nous intéressons à la combustion dans la chambre des fours à gaz, et à l'étude de l'interaction des produits de combustion dans les fours à gaz, telles que les flammes et les fumées, avec la charge à traitée. Deux cas peuvent présentés, le premier cas est celui d'un mélange préalable du combustible et du comburant, et second cas est celui d'un mélange dans la chambre de combustion, c'est-à-dire avec une injection séparé des constituants de la combustion. En effet, ce dernier existe dans diverses applications techniques, telles que les brûleurs industriels, les moteurs diesel, les fours industriels, etc. La flamme du deuxième cas est plus étudiée pour des raisons écologiques, et parce qu'il est généralement plus facile de contrôler, et de produire une combustion très proche d'une combustion complète, lorsque le comburant est injecté séparément du combustible.

La maîtrise du phénomène de la combustion et de la récupération de la chaleur des produits de combustion est la clé de l'efficacité énergétique et du développement économique d'un pays. L'Algérie étant un pays aux ressources pétrolières et gazières, doit disposer de ressources humaines et d'un grand nombre de recherches scientifiques spécialisées dans le domaine de la combustion et ses applications.

Sachant que la plupart des installations industrielles utilisent des brûleurs, des tubes radiants, ou des boîtes radiant fonctionnant au gaz naturel pour obtenir une énergie thermique, le domaine de recherche qui s'intéresse à l'économie, la récupération, et à la valorisation de l'énergie thermique issue de la combustion du gaz naturel est toujours

d'actualité. Ce domaine a pour objectif la diminution des pertes d'énergie et l'obtention d'une chauffe rapide.

Les fours à gaz industriels utilisent l'air ambiant et éventuellement le gaz naturel extrait au SAHARA. Le gaz utilisé est composé d'éléments tels que le méthane ( $\text{CH}_4$ ), l'éthane ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), le propane ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), le butane ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), le pentane ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ), le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et l'azote ( $\text{N}_2$ ) respectivement de concentrations ( $\text{CH}_4$ ) = 0.796 ; ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) = 0.074 ; ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) = 0.027 ; ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) = 0.014 ; ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) = 0.036 ; ( $\text{CO}_2$ ) = 0.002 et ( $\text{N}_2$ ) = 0.051. L'air étant un élément essentiel pour la combustion il se constitue de 20.83% d'oxygène ( $\text{O}_2$ ), 79.16% d'azote ( $\text{N}_2$ ) et de quelque trace de gaz rares.

### III.2 La combustion

La combustion est l'ensemble de réactions chimiques qui dégagent de la chaleur dans son ensemble, qui est d'abord lente, mais devient ensuite rapide voire violente, accompagnée d'émission de rayonnement et d'élévation de température, qui peuvent être transformées par le dégagement de chaleur qui se produit au cours de ce processus. Soit un corps combustible qui est partiellement ou totalement oxydé par corps oxydant (le comburant), qui est généralement de l'air ou de l'air enrichi en oxygène. Les combustibles peuvent être solides, liquides ou gazeux, principalement composés de carbone et d'hydrogène, et d'une faible quantité d'oxygène, d'azote, de soufre ainsi qu'une faible quantité de matériaux non combustibles.

Les réactions chimiques ne se produisent que lorsque des substances chimiques, des atomes, des ions, des radicaux libres, et des molécules interagissent pour la première fois ou sont au moins suffisamment proches pour se modifier par des mécanismes complexes. Si la réaction maximise l'oxydation du carburant, on pourrait écrire [22] :



Où a, b, c, d représentent les coefficients stœchiométriques

Le but de cette écriture est simplement d'indiquer quels sont les réactants et les produits de la combustion. On l'appelle (réaction d'équilibre stœchiométrique). Cela n'indique tout simplement pas ce qui se passera pendant le processus de combustion.

Comme mentionné précédemment, les flammes activent non seulement des phénomènes chimiques, mais aussi des phénomènes de diffusion et de convection qui sont des phénomènes physiques et mécaniques, dans lesquels les gaz, représentants les réactants et les produits, sont transportés.

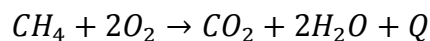
La combustion est une réaction chimique impliquant l'oxydation du combustible par un comburant; les produits de la combustion sont également appelés gaz brûlés ou gaz de combustion. La combustion fournit de l'énergie thermique et émet généralement de la lumière.

Le développement de la société industrielle moderne et la protection de l'environnement reposent sur la maîtrise de cette réaction de combustion. Dans le mélange de combustion, nous trouvons :

- a. Le combustible ;
- b. Le comburant ;
- c. Le produit de combustion (fumée et flamme).

Le carburant (combustible) est un corps qui peut se combiner avec l'oxygène par une réaction d'oxydation exothermique. L'oxydation doit être assez vive pour se poursuivre normalement après amorçage. [22]

Le méthane, le principal composant du gaz naturel, brûle avec l'oxygène pour libérer de la chaleur [23] :



La nature du réactif est définie, et pour caractériser le milieu réactionnel, il est nécessaire de préciser sa composition.

Une méthode pratique consiste à comparer le rapport (combustible/oxydant) avec un rapport de référence appelé rapport stœchiométrique.

Le rapport stœchiométrique reflète le fait qu'il y a une quantité minimale de comburant dans le combustible, théoriquement et nécessaire pour l'oxyder complètement

L'expression :

$$\varphi = \frac{\left(\text{Combustible}/\text{Comburant}\right)_{\text{vrai}}}{\left(\text{Combustible}/\text{Comburant}\right)_{\text{stoechio}}}$$

Définie la richesse du milieu réactionnel ;

- Si  $\varphi = 1$  (le mélange est stœchiométrique)
- Si  $\varphi > 1$  (le mélange est riche en combustible)
- Si  $\varphi < 1$  (le mélange est pauvre en combustible)

On définit l'excès de comburant par :

$$e \% = 100 * (1 - \varphi) / \varphi$$

On définit le défaut de comburant par :

$$d \% = 100 * (\varphi - 1) / \varphi$$

### III.3 Les combustibles

Il existe de nombreux types de carburants (gaz, pétrole, bois, charbon, ...), mais ils ont un point commun : ils contiennent principalement des hydrocarbures, c'est-à-dire une variété de combinaisons de carbone et d'hydrogène.

D'une manière générale, les carburants industriels traditionnels sont des mélanges complexes de divers composés organiques, qui contiennent les éléments chimiques suivants : C, H, O, N et S ...etc.

Ainsi, d'une manière formelle, un combustible pourrait être représenté par la formule chimique globale  $C_n H_m O_p N_g S_t$

Il existe divers types de combustibles, dont on cite :

- Le charbon
- Les gaz raffinés

- Les huiles qui sont dérivées du pétrole
- Gaz naturel
- Le gaz de sidérurgie

### **III.3.1 Les différentes catégories de combustibles**

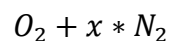
- Combustibles solides
- Combustibles liquides
- Combustibles gazeux

Cependant, quelle que soit la nature du carburant, la réaction de combustion proprement dite ne peut se produire que lorsque les réactifs sont gazeux. Si le carburant n'est pas gazeux, il se pré-évoquera ou se sublimera (éventuellement après décomposition chimique).

### **III.4 Les comburants**

Généralement, les comburants industriels sont constitués d'oxygène (l'oxydant proprement dit) plus ou moins dilué avec de l'azote

Le comburant répond à la formule générale :



A l'échelle industrielle, les plus fréquemment utilisés sont :

- L'air qui comprend principalement de l'oxygène, de l'azote, de la vapeur d'eau et du CO<sub>2</sub>
- L'oxygène pur.

Ils peuvent être ajoutés au carburant préalablement, soit :

Sous forme d'alliages chimiques, sous forme d'air ou d'oxygène liquide, comme dans les explosifs et le carburant de fusée. [24]

**III.5 Triangle du feu**

Ce n'est que lorsque nous rassemblons trois éléments, symboliquement appelés le triangle du feu, que la combustion se produit :

**III.5.1 Un combustible (le réducteur)**

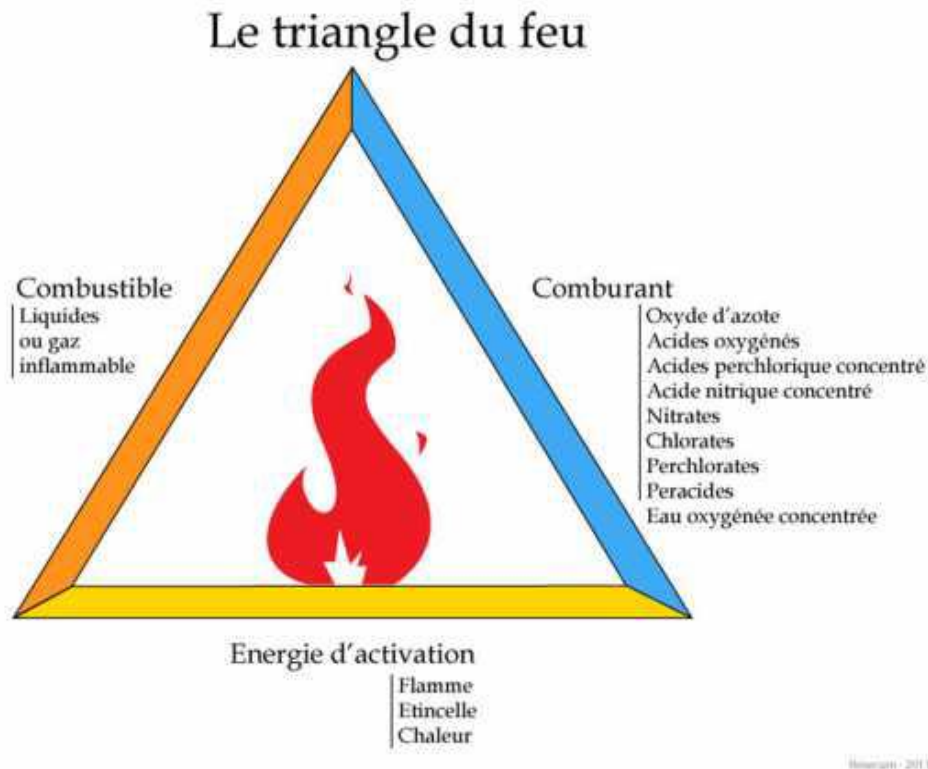
C'est une substance qui peut être brûlée en présence d'un comburant, et c'est généralement un produit organique, c'est-à-dire qu'il est principalement composé de carbone et d'hydrogène (ex : méthane, essence, alcool...). Dans nos recherches, nous utiliserons le méthane  $\text{CH}_4$  comme combustible.

**III.5.2 Un comburant (oxydant)**

Habituellement, l'air ambiant est surtout de l'oxygène, qui est un bon oxydant.

**III.5.3 Une énergie d'activation**

Généralement de la chaleur ou des flammes, telles que des flammes produites par des étincelles. [25]



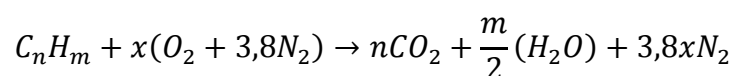
**Figure 15: Le triangle du feu montrant l'association des trois éléments indispensables pour une combustion chimique. [26]**

### III.6 Les Différents types de combustion [27-28]

#### III.6.1 La combustion neutre

La combustion dite neutre est réalisée en utilisant la quantité de comburant strictement nécessaire à la combustion complète du combustible, sans excès ni déficit de comburant. Elle est également considérée comme théorique car il est bien connu que la combustion complète obtenue à partir d'un mélange stœchiométrique constitue une situation idéale. En d'autres termes, les fumées ne contiennent pas d'oxygène.

Un gaz contenant plusieurs hydrocarbures (dans le cas du gaz naturel) peut être réduit à une formule équivalente de formule  $C_nH_m$ . La combustion stœchiométrique s'écrit :



Avec :

$$x = n + \frac{m}{2}$$

### III.6.2 Combustion rapide

La combustion rapide est une forme de combustion dans laquelle une grande quantité de chaleur et d'énergie est libérée sous forme de lumière, donnant naissance au feu. Elle est utilisée dans certaines machines, comme les moteurs à combustion interne.

### III.6.3 Combustion lente

La combustion lente est une réaction qui conduit à un faible dégagement de chaleur, presque pas d'augmentation de température et pas de flamme

### III.6.4 Combustion incomplète (en défaut d'air ou avec excès de combustible)

La combustion incomplète se produit lorsqu'il n'y a pas assez de comburant pour faire réagir complètement le combustible, ou lorsque le temps de contact à la température à laquelle la combustion est possible est trop faible. Par conséquent, elle produit des résidus de combustion sous forme de cendres, qui produisent des fumées dont certaines sont très toxiques pour l'homme et l'environnement tel que le monoxyde de carbone (gaz mortel), des particules de carbone pur (suie, goudron, cendres), des oxydes d'azote, des hydrocarbures (cancérogènes tel le benzène, ou fortement toxiques telles les HAP), des composés organiques volatiles.

### III.6.5 La combustion avec excès d'air

On l'appelle aussi oxydante complète. C'est un principe de combustion, qui s'applique à une large gamme de domaines de production de chaleur. Elle est dite oxydante car elle se produit en présence d'un excès de comburant, c'est-à-dire à la richesse  $\phi < 1$ , elle est dite complète qu'au même titre que la combustion neutre théorique.

Dans l'industrie il n'est pas possible d'ajuster aussi exactement le débit d'air au débit de combustible. Pour avoir une combustion complète, on assure en général un excès d'air, car un défaut d'air est toujours la cause d'une plus forte perte par les fumées.

### **III.7 La différence entre la combustion prémélangée et non prémélangée**

#### **III.7.1 La combustion prémélangée**

En termes de dégagement d'énergie, la combustion prémélangée est a priori la plus efficace, car les réactifs ont été en contact avant la zone de flamme. D'autre part, cette flamme peut se propager dans le mélange carburant/comburant, elle peut donc s'élever le long du flux d'air en amont de la chambre jusqu'à l'endroit où se produit le mélange, ce qui peut poser des problèmes de sécurité. Cela n'est pas le cas pour les flammes de diffusion.

#### **III.7.2 La combustion non-premélangée**

La combustion turbulente non prémélangée se rencontre le plus souvent dans les brûleurs à gaz industriels. La turbulence joue un rôle essentiel dans le mélange des gaz le plus rapidement possible. Ceci est principalement dû au fort gradient de vitesse entre l'air et le gaz. Pour la combustion non prémélangée, la fraction de mélange basée sur un modèle semble fournir la description chimique la plus efficace [29].

### **III.8 Les instabilités de combustion**

L'instabilité de combustion est généralement un problème majeur rencontré dans la conception des chambres de combustion et des systèmes de propulsion, qui se caractérise par de grandes oscillations dans les paramètres de l'écoulement (débit, pression, etc.) et de la combustion (dégagement de chaleur).

Pour beaucoup d'installations il s'agit d'un phénomène indésirable dont les effets sont gênants:

- Oscillations mécaniques de la structure du système.
- Augmentation du transfert de chaleur aux parois (pouvant conduire à la dégradation de celles ci).
- Déstabilisation de la flamme.

L'instabilité de combustion résulte de l'interaction de deux ou plusieurs phénomènes physiques. Le processus initial produira des perturbations d'écoulement qui interagissent avec la flamme. Un processus de retour de couple, le taux de réaction change pour le processus initial. Généralement, le processus de refoulement relie le flux aval à l'amont qui induit la perturbation. Ce couplage est réalisé par des ondes sonores se déplaçant vers l'amont. Ce couplage peut être aussi réalisé par les vibrations de la structure.). En fait, il existe trois types d'instabilité de combustion [30]:

- a. Les instabilités des systèmes
- b. Les instabilités propres au foyer
- c. Les instabilités intrinsèques

### **III.9 Les flammes de combustions**

Il existe plusieurs flammes, mais dans notre travail on va présenter trois types de flammes

#### **III.9.1 Définition d'une flamme**

La flamme est le milieu réactionnel dans lequel se produit la réaction de combustion. Elle est généralement liée à des zones émettrices de lumière réactives appelées fronts de flammes, ondes de combustion et même zones de combustion. Les caractéristiques de propagation spatiale des flammes sont déterminées par des processus chimiques (production rapide de chaleur et d'espèces chimiques réactives), physiques (transport, diffusion), ainsi que par le déplacement de matière (diffusion moléculaire ou transfert de masse) et de chaleur (convection et rayonnement). Par conséquent, la flamme (zone de réaction) est le résultat du transport des espèces, du transport de la chaleur et d'une réaction chimique. Il existe deux types de flamme (La flamme prémélangée, La flamme non prémélangée) [31]

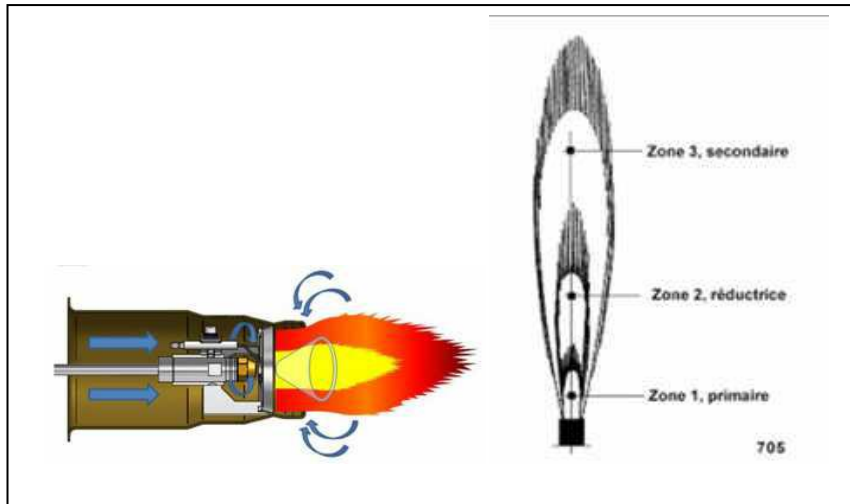


Figure 16: La flamme de combustion [31]

### III.9.2 Paramètres et caractérisations d'une flamme

Le concept de flamme contient différents processus, qui peuvent être caractérisés par différents paramètres, qui ont l'avantage de permettre une classification.

Les trois paramètres principaux sont :

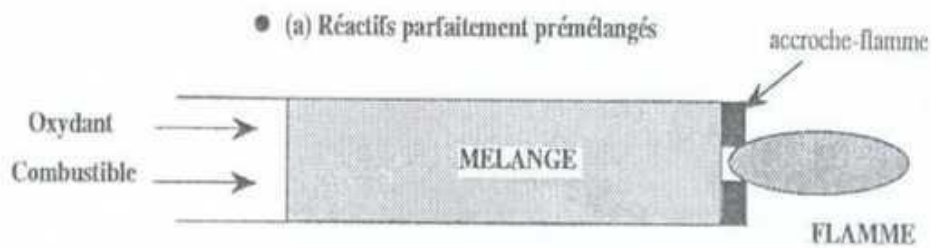
- La nature et le nombre de réactifs
- le mode d'introduction des réactifs
- Le régime d'écoulement des gaz dans le milieu réactionnel. [31]

### III.9.3 LES DIFFÉRENTS TYPES DE FLAMMES [32]

Il existe deux types de flammes : les flammes prémélangée et les flammes de diffusion.

#### III.9.3.1 La flamme prémélangée

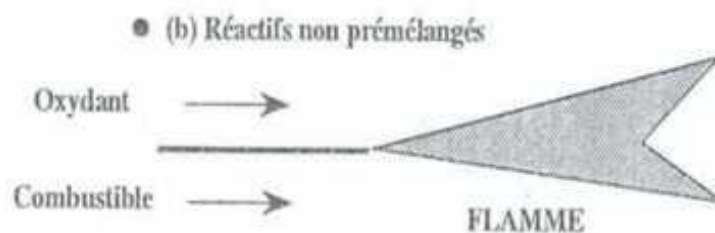
Le gaz et le comburant sont mélangés pour arriver à un rapport plus ou moins proche de la concentration stœchiométrique. La flamme obtenue est fondamentalement neutre. Sa dimension est stable, le débit de gaz est donc égal à la vitesse de propagation du front de flamme. La flamme semblait presque statique. C'est la flamme d'un bec Bunsen ou d'une cuisinière à gaz. La flamme résultante est de forme de conique et émet une lumière bleue.



**Figure 17: La flamme prémélangée**

### III.9.3.2 La flamme non prémélangée

Comme le combustible et l'oxydant ne sont pas prémélangés, la propagation de la flamme est essentiellement contrôlée par des phénomènes d'inter-diffusion de la chaleur et des radicaux libres. Lorsque le gaz combustible est mélangé à de l'air, la combustion se poursuit, et sa richesse passe d'une valeur très élevée au front de flamme à une valeur très faible. Les combustibles sont généralement décomposés par la chaleur avant d'être mélangés à l'oxygène, et on constate qu'ils sont séparés par des produits de combustion intermédiaires au sommet de la flamme. La concentration d'oxygène et de gaz a tendance à dépasser la valeur stœchiométrique puis à rétablir immédiatement leur équilibre. La vitesse de réaction est nettement supérieure à la vitesse du phénomène de diffusion, et l'équilibre sera maintenu au front de flamme.



**Figure 18: La flamme non prémélangée**

La zone réactionnelle de la flamme de diffusion (non prémélangée) est plus épaisse que la zone réactionnelle de la flamme prémélangée, et sa température se rapproche rapidement du maximum. Par rapport aux flammes produites par prémélangée de combustible et d'oxydant, les flammes de diffusion ont une forme plus ambiguë. L'exemple le plus courant d'une flamme de diffusion est celle produite par une bougie.

En pratique, dans un feu, la flamme est essentiellement une flamme de diffusion, mais on distingue souvent la flamme bleue prémélangée au fond. Ceci est plus vrai lorsque la flamme est dans un état turbulent. Selon la taille des particules, la combustion des aérosols peut provoquer des flammes prémélangées ou diffuses.

### III.10 Le pouvoir calorifique (PCI et PCS)

Le pouvoir calorifique du carburant est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1kg du carburant. Étant donné que le carburant contient généralement de l'hydrogène, de l'eau est produite lorsqu'elle est brûlée. Dans un grand nombre d'applications : l'eau s'échappe de la cheminée sous forme de vapeur. Dans d'autres applications (chaudière par exemple), la fumée apparaît sous forme de vapeur d'eau, et cette condensation est exothermique. On distinguera donc :

**III.10.1 Le pouvoir calorifique inférieur (PCI)** qui est l'énergie récupérée par combustion, c'est-à-dire la quantité de chaleur libérée lors de la combustion complète, et l'eau formée est évacuée sous forme de vapeur et s'échappe dans l'atmosphère avec les fumées.

**III.10.2 Le pouvoir calorifique supérieur (PCS)** qui est l'énergie récupérée par combustion, à laquelle s'ajoute la récupération des calories contenues dans la condensation de la vapeur d'eau dans les fumées. Du fait de la récupération de la chaleur de vaporisation et de la référence au PCI, la chaudière à condensation offre un rendement supérieur à 100% sur PCI [33].

$$PCI = Q_c + Q_f$$

### III.11 Rendement de combustion

On appelle le rendement de combustion le rapport :

$$\eta_c = \frac{PCI + Q_a - Q_f}{PCI}$$

Où :

$Q_a$  et  $Q_f$  respectivement la chaleur apportée par l'air et les pertes par les fumées.

Le rendement de la combustion dépend uniquement du combustible, des conditions d'excès d'air pour brûler le combustible et de la température du fluide entrant et sortant du four. Cela ne dépend pas du type de four ou de sa technologie.

Si nous considérons le four et tout équipement de préchauffage de l'air des fumées comme un seul système, et dans ce cas considérons la température des fumées en aval du réchauffeur d'air [34] :

$$\eta_c = \frac{PCI - Q_f}{PCI}$$

### III.12 Bilan thermique de combustion

#### III.12.1 Calcul le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gaz naturel

Le pouvoir calorifique d'un combustible est donné par la formule suivante [33] :

$$PCI = 0,01 \cdot [(Q_{CH_4} \cdot CH_4) + (Q_{C_2H_6} \cdot C_2H_6) + (Q_{C_3H_8} \cdot C_3H_8) + (Q_{C_4H_{10}} \cdot C_4H_{10}) + (Q_{C_5H_{12}} \cdot C_5H_{12})]$$

**Tableau 4: Pourcentage en volume de la composition des principaux combustibles gazeux**

Gaz combustibles élémentaires	Gaz du Sahara (%)
CH <sub>4</sub>	79,6
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	7,4
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2,7
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1,4
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3,6

# **Chapitre IV**

## Le transfert de chaleur dans les fours

**IV.1 Introduction**

Le procédé utilisé dans l'industrie est généralement un lieu d'échange de chaleur (fours, échangeurs de chaleur, induction, refroidissement, chauffage). Les phénomènes de transfert thermique, en particulier la chaleur, sont d'une importance décisive pour la recherche et l'exploitation des équipements tels que ; les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs de chaleur, les condenseurs, ...etc. En raison du développement rapide de l'industrie et de l'augmentation continue de la demande et des prix de l'énergie, dans tous les cas, l'utilisation efficace d'une installation (d'échange de chaleur) avec une consommation d'énergie minimale est un objectif idéal.

Le transfert de chaleur est une science qui tente de prédire le transfert d'énergie entre des molécules ou des particules de matière à différentes températures. Le but est d'expliquer la méthode d'échange de chaleur dans certaines conditions et de prédire le taux d'échange de chaleur. Il complète les deux premiers principes de la thermodynamique par des lois expérimentales supplémentaires pour établir le rapport de transfert d'énergie.

Le transfert de chaleur est une science qui englobe plusieurs concepts pratiques de base utilisés dans de nombreuses applications industrielles. Le transfert de chaleur peut être effectué par trois mécanismes différents, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement. Par conséquent, des connaissances de base dans ce domaine sont essentielles pour comprendre et maîtriser l'application pratique de ces phénomènes.

Le transfert de chaleur peut être défini comme le transfert d'énergie d'une zone à une autre une fois que la différence de température entre elles est déterminée. Elle est régie par une combinaison de lois physiques et de relations empiriques dérivées d'expériences.

La chaleur est une qualité de ce qui est physiquement chaud. C'est une énergie qui conduit la température vers le corps. Elle se manifeste par un flux thermique. Elle a la capacité de se propager dans des endroits avec des différences de température. Elle s'écoule toujours de la zone la plus chaude vers la zone la plus froide, et peut appartenir au même objet ou à des objets différents, elle suit donc la direction positive du gradient de température.

Le transfert de chaleur peut se manifester de trois façons : la conduction, la convection et le rayonnement.

## IV.2 Transmission globale de la chaleur dans les fours [35]

L'élément principal dans le calcul de la puissance d'un four est la connaissance de l'intensité de transmission de chaleur, également appelée flux thermique. Cette intensité est le résultat de trois flux de chaleur différents :

- V.3 La chaleur transférée par convection entre les fumées et la charge.
- VI.3 La chaleur transférée entre les fumées et la charge par rayonnement gazeux.
- VII.3 La chaleur transférée par rayonnement entre les parois du four et la charge.

Cette dernière partie provient de la chaleur transférée aux parois du four à travers la convection et le rayonnement des gaz de combustion, et moins de pertes de paroi du four.

Tous les échanges de chaleur dans le four sont indiqués sur la figure (1)

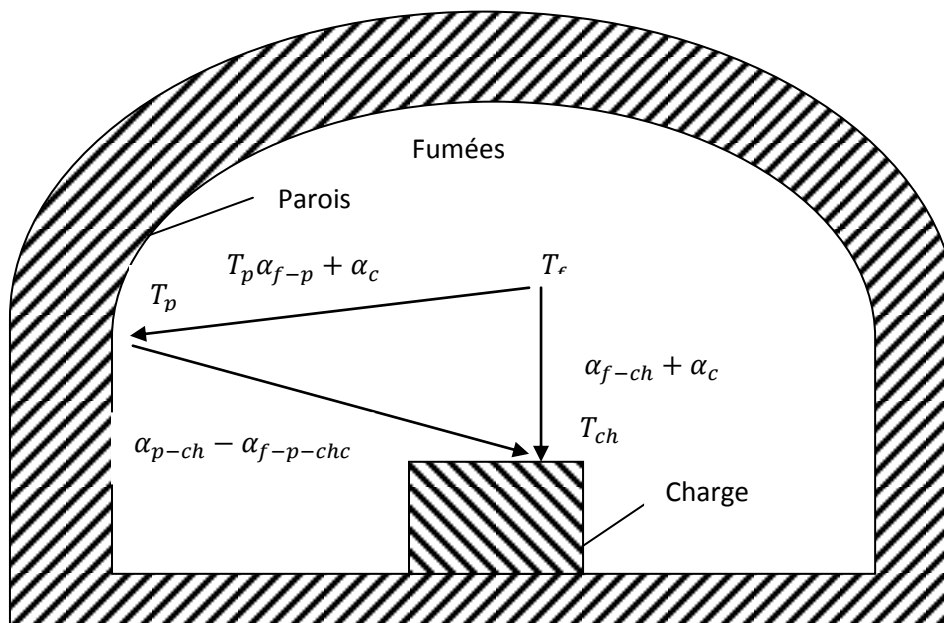


Figure 19: schéma de la transmission de chaleur dans un four

La fumée à température  $T_f$  transfère la chaleur à la paroi de température  $T_p$  par rayonnement et convection en même temps. La charge reçoit une certaine quantité de chaleur du mur par rayonnement, qui est fonction de leur différence de température et du coefficient de flux de chaleur rayonnante. Elle reçoit également les fumées directement de la chaleur transférée par rayonnement et convection. La température des parois est le résultat de l'équilibre entre la chaleur reçue et la chaleur émise.

### IV.3 Modes du transfert de la chaleur [36,37]

#### IV.3.1 Transferts radiatifs

Dans la littérature, il existe de nombreux travaux sur la description complète des transferts par rayonnement Gorog *et al.*, (1981) ; Barr *et al.*, (1989). Ils donnent une description détaillée des transferts de chaleur entre les gaz, les matériaux et la paroi du four en employant la méthode de décomposition par zone proposée par Hotell, (1968). Ces auteurs ont montré que la majorité des transferts par rayonnement sont localisés dans une section transversale du four.

Le rayonnement est le transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu à haute température à un autre milieu à basse température sans aucun support matériel (il peut se produire dans le vide). De manière générale, tout objet opaque ou partiellement opaque chauffé à une température supérieure à zéro Kelvin rayonnera de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie est transmise sous forme d'ondes électromagnétiques, et sa propagation ne nécessite pas de support matériel. Les gaz, les liquides et les solides peuvent émettre et absorber un rayonnement thermique.

L'émission du rayonnement par corps, provoque une diminution de sa température, à moins que la température soit produite à l'intérieur de ce corps ou que ce corps reçoit de la chaleur d'une source (par exemple les parois des fours).

La température d'un corps reste constante seulement s'il reçoit ou produit une quantité de chaleur équivalente à l'énergie d'émission.

Le pouvoir émissif d'une surface grise est donné par :

$$E_g = \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot T^4$$

Où  $\varepsilon_g$  est le facteur d'émission pour le rayonnement d'un corps gris

$\sigma$  est la constante de Boltzmann

Pour les transferts de chaleur par rayonnement, l'importance des échanges dépend fortement du niveau de la température. Les transferts de chaleur par rayonnement thermique sont liés aux ondes caractéristiques et à la direction de l'émission. Tous les corps rayonnent.

Le rayonnement est un mode d'échange de chaleur par émission et absorption de radiation électromagnétique. La détermination des flux de chaleur échangés par rayonnement nécessite la connaissance des propriétés radiatives, et plus particulièrement les émissivités, des solides, de la paroi et des gaz ainsi que le choix d'un modèle de rayonnement.

### IV.3.2 Transferts conductifs

Ce type de transfert de chaleur est souvent rencontré dans les cas des corps solides.

La conduction est définie comme le mode de transfert de chaleur dans un milieu opaque (solide, liquide ou gazeux), et le matériau ne sera pas déplacé en présence d'un gradient de température. Elle se produit selon deux mécanismes différents : la transmission par vibration de molécules ou d'atomes et la transmission par électrons libres. En présence d'un gradient de température, ce mode se produit dans la même phase stationnaire ou mobile. Dans ce cas, le transfert de chaleur est le résultat du transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul mode de transfert qui existe dans les solides opaques (qui absorbent toute la lumière). Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Pour les fluides (gaz ou liquides), la convection et le rayonnement peuvent se chevaucher.

Le flux de chaleur  $\Phi$  produit par conduction pour une paroi d'épaisseur  $e$  et de conductivité  $\lambda$  est :

$$\Phi = \lambda[(T_i - T_e)/e].S$$

Où :  $T_i$  est la température de la surface intérieure

$T_e$  est la température de la surface extérieure

$S$  est la surface des parois.

## IV.2 Transferts convectifs

La convection implique essentiellement le transfert d'énergie par le mouvement macroscopique d'une parcelle (grand nombre de molécules), généralement d'une zone du fluide à une autre. Ce mécanisme s'accompagne toujours d'un transfert d'énergie provoqué par le mouvement moléculaire et qui représente le côté conductif de ce mode.

La convection est le mécanisme le plus important dans le transport d'énergie entre une surface solide et un liquide ou gaz.

Le mouvement des fluides peut être provoqué par deux procédés :

- **La convection naturelle (convection libre)**, où le mouvement des particules est provoqué par la différence de température imposée au fluide. La différence de température signifie la différence de densité (déplacement des particules, dilatation), exemple (chauffage de l'eau dans un récipient).
- **Convection forcée**, où le mouvement des particules est provoqué par la pression appliquée au fluide par des moyens mécaniques (par exemple à partir d'une pompe). En présence d'un gradient de température, le transfert de chaleur par convection se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement. Le mouvement du fluide peut être provoqué par la différence de densité provoquée par la différence de température.

On exprime le flux de chaleur  $\phi$  transmise par convection entre une paroi solide et un fluide au moyen de l'équation :

$$\phi = S \cdot h \cdot (T_s - T_f)$$

Où  $S$  est la surface des parois

$h$  est le coefficient d'échange de chaleur par convection

$T_s$  est la température de la surface des parois

$T_f$  est la température du fluide

Cette loi permet de quantifier la chaleur échangée par unité de temps. Cette quantité de chaleur est liée à plusieurs paramètres : la différence de température entre le solide et le fluide ( $T_s - T_f$ ), la surface d'échange  $S$ , et un coefficient d'échange  $h$ . L'un des problèmes majeurs dans la détermination du flux convectif consiste à déterminer ce coefficient d'échange  $h$  qui est le résultat de différents mécanismes de transfert à l'interface liés à de nombreux paramètres tels que : la température, la vitesse du fluide, la capacité thermique du fluide, l'état de surface du solide et la géométrie.

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est une fonction complexe de l'écoulement du fluide, des propriétés thermiques du milieu et de la géométrie du système.

La valeur est généralement inégale en surface et dépend également de la température du fluide.

Le transfert de chaleur entre la paroi solide et le fluide implique une conduction et un transfert de masse. Si la température de la paroi est supérieure à celle du fluide, la chaleur s'écoule d'abord par conduction du solide vers les particules fluides situées à proximité de la paroi.

L'énergie ainsi transférée augmente l'énergie interne du fluide portée par le mouvement du fluide. Lorsque les particules du fluide chaud atteignent la zone de basse température, la charge électrique est à nouveau transférée du fluide chaud vers le fluide froid.

Le transfert d'énergie de la convection étant étroitement lié au mouvement du fluide, il est nécessaire de comprendre le mécanisme de l'écoulement avant de vérifier la position du flux de chaleur.

L'un des aspects les plus importants de la recherche en mécanique des fluides est de déterminer si le mouvement d'un fluide est laminaire ou turbulent.

Comme pour la conduction, les transferts de chaleur par convection résultent d'une différence de température mais ne dépendent pas du niveau de température. L'étude des transferts de chaleur par convection permet de caractériser les échanges entre un fluide et un solide. Quel que soit le régime d'écoulement du fluide.

# **Chapitre V**

Dimensionnement du four  
pour le recyclage des  
canettes en Aluminium

**V.1 Introduction**

Un four de fusion est une installation qui permet d'amener un métal ou un alliage à l'état liquide. Son utilisation est courante en métallurgie ou en fonderie. Les modèles proviennent de diverses technologies, aujourd'hui, presque exclusivement à partir de combustibles fossiles. On trouve par exemple des fours rotatifs, haut-fourneau et cubilot, fours à creuset ...

**Haut-fourneau et cubilot (fabrication de fonte)**

Ils sont constitués par une paroi verticale cylindrique ou conique. La charge est enfournée par le dessus avec du coke. L'air de combustion, insufflé par des tuyères, est parfois préchauffé par procédés électriques (résistances ou torche à plasma) ou par récupération d'énergie sur les gaz chauds. Le métal liquide coule par un orifice situé en partie basse.

**Four rotatif**

Il est composé d'un cylindre isolé, horizontal (ou légèrement incliné), mobile autour d'un axe de rotation avec des ouvertures au sommet et à la base du cylindre pour le chargement, la coulée et le passage de brûleur (fixe).

**Four à creuset**

Il est constitué d'un creuset, en matériau métallique ou céramique (selon la température), entouré d'un équipement de chauffe qui provoque la fusion de la charge déversée à l'intérieur. L'ensemble du four contenant le creuset peut être pivotant pour vider le liquide après fusion. L'équipement de chauffe peut se composer soit d'un ou plusieurs brûleurs, soit de résistances électriques, soit d'un inducteur.

## V.2 Le choix du type de four

Il existe différents types de chauffage en termes de fusion requise, d'efficacité énergétique et de performances. Ce choix dépend en grande partie du four de fonderie. Les deux types de fours largement utilisés dans l'industrie sont les fours à gaz, et les fours électriques.

Le four à gaz est un modèle économique, d'une part car le prix du gaz est inférieur à celui de l'électricité et car ce type de four est peu gourmand en énergie. Ceci est recommandé pour choisir ce type de four.

Cela nous recommande le choix d'un four fonctionnant d'une façon discontinue, et cela pour éviter tout fonctionnement du four pendant l'arrêt de la chaîne de fusion des canettes d'aluminium, et répondre ainsi aux exigences économiques et technologiques exigées par une industrie moderne.

A cause de la disposition appropriée de la charge, on choisit un four discontinu à charge immobile. En outre, on doit utiliser une atmosphère protectrice et un chauffage indirect pour éviter le phénomène de la contamination de la charge et de l'oxydation.

Dans ce four, l'air de combustion et le combustible sont préchauffés par les gaz issus de la combustion. Par la suite, ils sont introduits dans les proportions requises, dans les tubes radiants. Les gaz issus de la combustion montent et transmettent une partie de leur chaleur au creuset dans la chambre de fusion par rayonnement. Un système de récupération de la fumée, permet de l'utiliser pour préchauffer le comburant et le combustible.

## V.3 Le choix du mode de chauffage du four

Le type de four étant choisi, la source d'énergie est une énergie résultante d'une combustion gazeuse produite par un chauffage indirect.

Du point de vue régulation, l'énergie électrique est plus rentable, par contre d'après l'aspect énergétique, l'utilisation d'un combustible gazeux est meilleur, d'où le choix d'un combustible gazeux qui est le gaz naturel de HASSI R'MEL constitué par des éléments comme le Méthane ( $\text{CH}_4$ ), l'éthane ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), le propane ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), le butane ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), le pentane ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ), l'azote ( $\text{N}_2$ ) et le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) d'ont la composition chimique se rapport respectivement à :

Tableau 5: composition en % du combustible et de ses caractéristiques à 25°C [38]

éléments	% en masse	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/mol.K)	PCI (MJ/Kg)
CH <sub>4</sub>	79.6	0.657	35.309	50.03
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	7.4	1.3551	52.63	47.794
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.7	493	73.51	45.8
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.4	573	97.45	45.6
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3.6	626	122.884	45.357
N <sub>2</sub>	5.1	808	29.05	
CO <sub>2</sub>	0.2	1.977	38.418	

#### V.4 Le choix de l'atmosphère protectrice

Pour la fusion des canettes en aluminium, on choisie une atmosphère protectrice à gaz neutre.

Ceci dit, le gaz neutre est principalement composé de 97 % d'azote, ce qui présente l'avantage d'une faible teneur en éléments d'oxydation. Ceci nous permettra de minimiser le taux de l'alumine au sein du métal en fusion. La composition appropriée du gaz neutre nous permet de minimiser la protection contre les dangers d'explosion et de toxicité.

Le contrôle de l'atmosphère protectrice est assuré par une méthode simple. Cette méthode consiste en suivie de la valeur du point de rosé.

## V.4.1 Composition du gaz neutre

Tableau 6: La composition du gaz neutre

Elément gazeux	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O
% en masse	97.8	0.02	0.66	1	0.5	0.0122

– Point de rosé : -40°C

### V.4.1.1 Les avantages du gaz de l'atmosphère contrôlée

- ❖ La valeur basse du point de rosé
- ❖ faible teneur en élément décarburants et oxydants.

### V.4.1.2 Inconvénient du gaz de l'atmosphère contrôlée

L'existence de la surpression dans le four légèrement supérieure à la pression normale fait que l'air ne pénètre guère à l'intérieur du four, et entraîne une perte considérable en atmosphère protectrice dont le volume doit rester le même pendant toute la période du traitement. Ceci dit, nous complétons les pertes en gaz de l'atmosphère contrôlée par un ajout continuellement.

## V.5 Isolation des fours industriels [39]

### V.5.1 Matériaux réfractaires

Matériau réfractaire est un terme technique signalant une résistance à une influence chimique, physique ou biologique qu'il faudrait préciser, mais qui semble évidente dans chaque domaine technologique. Il s'agit souvent d'une bonne résistance à la chaleur, c'est-à-dire aux effets induits par les hautes températures, par des corps ayant un point de fusion élevé.

Physique des matériaux réfractaires Les matériaux réfractaires dont on dispose sont de trois types :

- Les matériaux préculs ;
- les matériaux non préformés ;
- Les matériaux fibreux.

### **a. Les matériaux préculs**

Ils se présentent sous forme de pièces standards (briques, coins, couteaux). Ils sont culs à haute température et parfaitement stabilisés. Leur composition chimique dépend du niveau de réfractarité que l'on veut atteindre. Leurs dimensions augmentent légèrement au cours de la montée en température du four, d'où la nécessité de prévoir des joints de dilatation lors de la construction.

### **b. Les matériaux non préformés**

Ils sont mis à la disposition de l'utilisateur en vrac. Mélangé sur le chantier avec un liant et parfois un agrégat complémentaire, leur mise en forme et leur cuisson se fait sur place. On distingue : Les bétons à liant hydraulique et Les plastiques à liant chimique. Portés à leur température d'utilisation, ces produits subissent une céramisation qui vient relayer ou conforter les liaisons hydrauliques existantes lors de leur mise en place. Cette céramisation se fait souvent avec un retrait dimensionnel dont il faut tenir compte lors de la conception et de la construction.

### **c. Les matériaux fibreux**

Ils sont composés de fibres de quelques centimètres de longueur et de quelques micromètres de diamètre mises sous forme de nappes, ou parfois sous forme de pièces de géométrie particulière. Les matériaux fibreux ont une densité apparente nettement plus faible que celle des produits précédents. Ils permettent donc de diminuer considérablement l'inertie thermique de la construction et ils sont particulièrement bien adaptés pour les fours à fonctionnement discontinu. Ils permettent également grâce à leur très faible densité de diminuer considérablement le poids des voutes.

## V.5.2 Dimensionnement des parois réfractaires

Une fois déterminée la qualité de la première couche de réfractaire, en fonction du niveau de température dans le four et des interactions chimiques en surface, le choix et le dimensionnement des couches réfractaires et isolantes arrières sont choisis en fonction des déperditions thermiques et/ou de la température de paroi extérieure maximale acceptables. Ce calcul se fait généralement, en supposant l'équilibre thermique atteint, avec comme objectifs :

- ❖ de trouver un optimum entre des épaisseurs et des déperditions énergétiques économiquement acceptables ;
- ❖ d'obtenir sur les parois extérieures une température compatible avec la circulation ou la présence de personnel.

## V.6 Dimensions de la charge

La charge est de 50 Kg ( $m_c=50\text{Kg}$ )

La charge est constituée du contenu de 2 palettes d'aluminium chacune pèse 25 Kg. Elles sont constituées de canettes écrasées et aplatées.

### V.6.1 Les dimensions d'une palette

$$L_p = 40 \text{ cm}$$

$$l_p = 30 \text{ cm}$$

$$h_p = 30 \text{ cm}$$

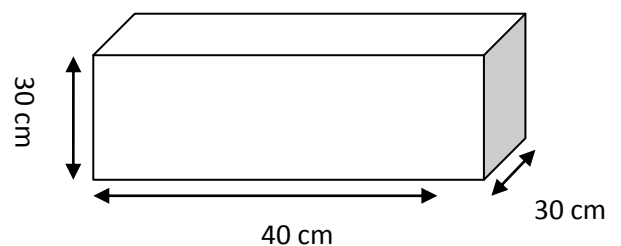


Figure 20: Les dimensions de la palette

## V.6.1.1 Le volume de la palette

$$\begin{aligned}V &= L \times l \times h \\ &= 30 \times 30 \times 40 \\ &= 36000 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

$$V_p = 0.036 \text{ m}^3$$

## V.6.1.2 La masse volumique de la palette

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\rho = \frac{25}{0.036}$$

$$\rho_p = 694.44 \text{ Kg/m}^3$$

## V.6.2 Les dimensions de la charge

$$L_p = 40 \text{ cm}$$

$$l_p = 30 \text{ cm}$$

$$h_p = 60 \text{ cm}$$

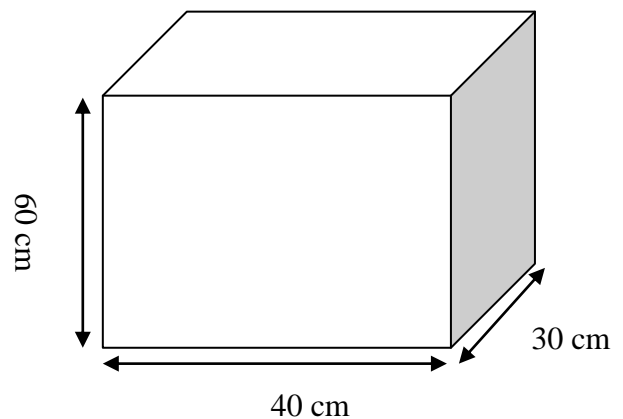


Figure 21: les dimensions de la charge

**V.6.2.1 Le volume de toute la charge**

$$\begin{aligned}V_C &= V_p \times 2 \\ &= 0.036 \times 2 \\ V_C &= 0.072 \text{ m}^3\end{aligned}$$

**V.6.2.2 Le volume de toute la charge après fusion**

$$\begin{aligned}1 \text{ m}^3 &\rightarrow 2700 \text{ Kg} \\ V_{C.f} &\leftarrow 50 \text{ Kg} \\ V_{C.f} &= \frac{50}{2700} \\ V_{C.f} &= 0.018 \text{ m}^3\end{aligned}$$

**V.6.3 La chaleur emmagasinée par la charge à 750°C  
(Charge en fusion)[40]**

$$\Phi_{ch} = m_{ch} \times c_p \times (T_{ch} - T_{amb})$$

$m_{ch}$  : La masse de la charge

$C_p$  : La capacité calorifique de la charge

$T_{ch}$  : La température de la charge

$T_{amb}$  : La température ambiante

$$\Phi_{ch} = 33872 \text{ KJ}$$

## V.7 Les dimensions du creuset :

Nous avons choisi le creuset en graphite afin d'éviter une contamination de la charge à fusionner.

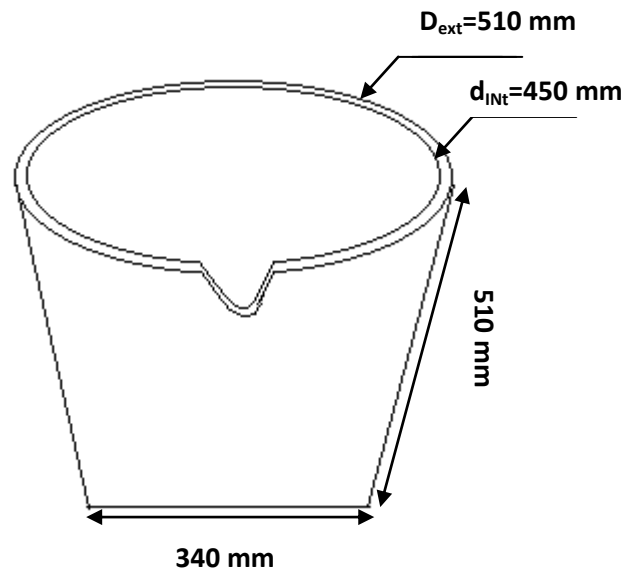


Figure 22: les dimensions du creuset

### V.7.1 La chaleur emmagasinée par le creuset [40]

$$\Phi_{cr} = m_{cr} \times c_p \times (T_{cr} - T_{amb})$$

$m_{cr}$  : La masse du creuset

$C_p$  : La capacité calorifique du creuset (Graphite)

$T_{cr}$  : La température du creuset

$T_{amb}$  : La température ambiante

$$\Phi_{cr} = 27856.8 \text{ KJ}$$

## V.8 Dimensions du four

Les dimensions du four sont liées directement aux dimensions de la charge et les parois.

### V.8.1 Calcul sur les parois du four

En premier lieu, on choisit la combinaison de parois suivante :

#### V.8.1.1 Combinaison1

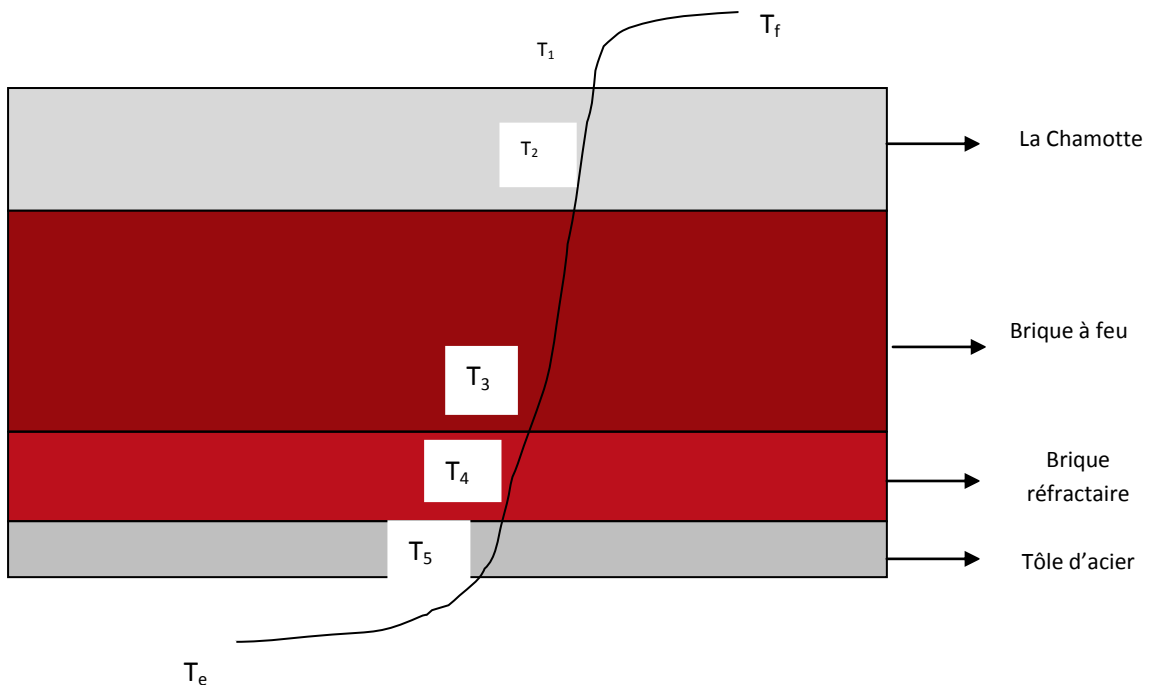


Figure 23: Parois du four pour la 1<sup>ère</sup> combinaison

$e_1 = 0.065 \text{ m}$	$\lambda = 0.45 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$	$\rho_{cha} = 1420 \text{ Kg/m}^3$
$e_2 = 0.23 \text{ m}$	$\lambda = 1.04 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$	$\rho_{b1} = 2000 \text{ Kg/m}^3$
$e_3 = 0.15 \text{ m}$	$\lambda = 0.70 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$	$\rho_{b2} = 1200 \text{ Kg/m}^3$
$e_4 = 0.002 \text{ m}$	$\lambda = 45 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$	$\rho_a = 7800 \text{ Kg/m}^3$

#### ❖ La chaleur emmagasinée par les parois [40,43]

$$\Phi_p = m_p [C_{pp}(T_{mp}) \cdot T_{mp} - C_{pp}(T_{ce}) \cdot T_{ce}]$$

$m_p$ : Masse totale des parois	[Kg]
$T_{m_p}$ : Température moyenne des parois	[°C]
$C_{p_p}$ : Capacité calorifique des différentes couches	[KJ/Kg. °C]

$$\phi_p = 2358886.509 \text{ KJ}$$

### ❖ La chaleur perdue par les parois [40]

$$\phi'_p = K \times (T_i - T_e) \times S$$

$$K = \frac{1}{\left(\sum \frac{e_i}{\lambda_i}\right) + \left(\frac{1}{\alpha_e}\right)}$$

$K$  : Le coefficient d'échange convectif

$e_i$  : L'épaisseur des couches

$\lambda_i$  : Conductivité thermique des couches

$\alpha_e$  : Coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance

$T_i$  : Température intérieure du four

$T_e$  : Température extérieure du four

$S$  : Surface externe du four

$$\sum \frac{e_i}{\lambda_i} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{e_4}{\lambda_4}$$

$$\phi'_p = 29153.27036 \text{ KJ}$$

### ❖ La chaleur nécessaire pour les parois du four

$$\phi_p = \phi_p + \phi'_p$$

$$\phi_p = 2388039.779 \text{ KJ}$$

V.8.1.2 Combinaison 2

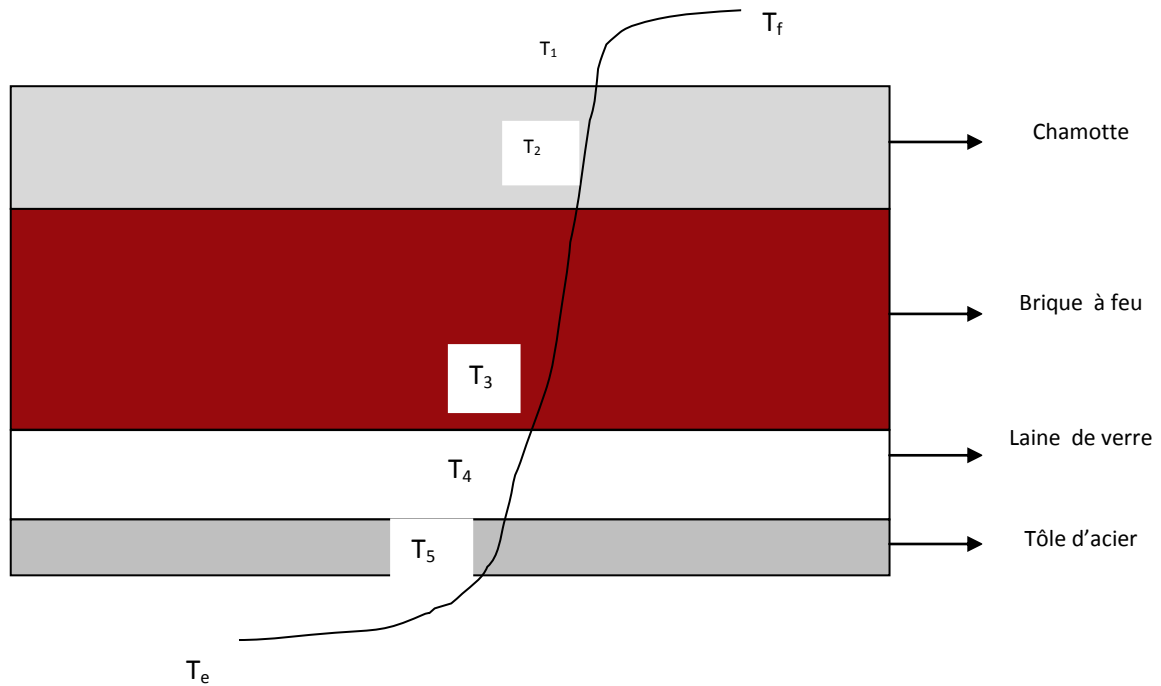


Figure 24: Parois du four pour la 2ème combinaison

$e_1 = 0.065 \text{ m}$	$\lambda = 0.45 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$	$\rho_{cha} = 1420 \text{ Kg/m}^3$
$e_2 = 0.23 \text{ m}$	$\lambda = 1.04 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$	$\rho_b = 2000 \text{ Kg/m}^3$
$e_3 = 0.4 \text{ m}$	$\lambda = 0.07 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$	$\rho_{lv} = 120 \text{ Kg/m}^3$
$e_4 = 0.002 \text{ m}$	$\lambda = 45 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$	$\rho_a = 7800 \text{ Kg/m}^3$

❖ La chaleur emmagasinée par les parois [40,43]

$$\Phi_p = m_p [C_{pp} (T_{mp}) \cdot T_{mp} - C_{pp} (T_{ce}) \cdot T_{ce}]$$

$m_p$  : Masse totale des parois [Kg]

$T_{mp}$  : Température moyenne des parois [°C]

$C_{pp}$  : Capacité calorifique des différentes couches [KJ/Kg. °C]

$$\Phi_p = 3274810.973 \text{ KJ}$$

## ❖ La chaleur perdue par les parois [40]

$$\phi'_p = K \times (T_i - T_e) \times S$$

$$K = \frac{1}{\left(\sum \frac{e_i}{\lambda_i}\right) + \left(\frac{1}{\alpha_e}\right)}$$

$$\sum \frac{e_i}{\lambda_i} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{e_4}{\lambda_4}$$

$K$  : Le coefficient d'échange convectif

$e_i$  : L'épaisseur des couches

$\lambda_i$  : Conductivité thermique des couches

$\alpha_e$  : Coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance

$T_i$  : Température intérieure du four

$T_e$  : Température extérieure du four

$S$  : Surface externe du four

$$\phi'_p = 6232.200939 \text{ KJ}$$

## ❖ La chaleur nécessaire pour les parois du four

$$\phi_p = \phi_p + \phi'_p$$

$$\phi_p = 3281043.174 \text{ KJ}$$

On choisit donc la 2ème combinaison, premièrement par ce que la sécurité des manipulateurs sera assurée, car la température externe du four est de 40°C. Deuxièmement la perte par transfert de chaleur dans le cas des deux combinaisons à était calculée pour un fonctionnement de 1 h de temps, et une prolongation du temps d'utilisation du four permettrait de d'augmenter plus la consommation d'énergie perdue par la première combinaison et d'inverser la situation.

## V.9 La chaleur emmagasinée par le brasseur [40]

Nous avons choisi l'utilisation des tubes radiants en acier, et de l'atmosphère afin d'éviter une contamination de la charge à fusionner.

$$\phi_b = m_b \times C_{pb} \times (T_b - T_{amb})$$

$m_b$  : La masse du brasseur

$C_{pb}$  : La capacité calorifique du brasseur

$T_b$  : La température du brasseur

$T_{amb}$  : La température ambiante

$$\phi_b = 5988.993 \text{ KJ}$$

## V.10 La chaleur emmagasinée par les tubes radiants [40]

$$\phi_T = m_T \times c_{pT} \times (T_T - T_{amb})$$

$m_T$  : La masse du tube radiant

$C_{pT}$  : La capacité calorifique du tube radiant

$T_T$  : La température du tube radiant

$T_{amb}$  : La température ambiante

$$\phi_T = 70565.961 \text{ KJ}$$

## V.11 La chaleur emmagasinée par l'atmosphère protectrice [40]

$$\phi_{atm} = m_{atm} [C_{p_{atm}}(750^\circ\text{C}) \times 750 - C_{p_{atm}}(20^\circ\text{C}) \times 20]$$

$m_{atm}$  : La masse des composants de l'atmosphère protectrice

$C_{p_{atm}}$  : La capacité calorifique des composants de l'atmosphère protectrice

$T_{atm}$  : La température des composants de l'atmosphère protectrice

$T_{amb}$  : La température ambiante

$$\phi_{atm} = 2998.32508 \text{ KJ}$$

**V.12 La chaleur perdue par les fumées [40,41]**

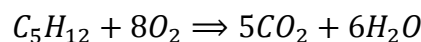
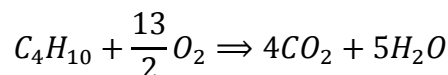
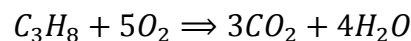
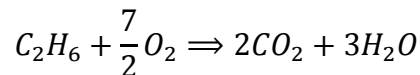
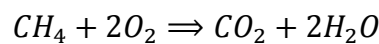
$$\Phi_f = V_f \times Cp_f \times T_f$$

$V_f$  : Le volume des éléments de la fumée

$Cp_f$  : La capacité calorifique des éléments de la fumée

$T_f$  : La température des fumées

Les produits de la combustion du gaz naturel (de HASSI R'MEL) sont le  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$  et l' $O_2$  selon les réactions suivantes où on considérera la combustion est complète :

**V.12.1 Le volume de  $CO_2$  contenu dans la fumée par 1m<sup>3</sup> de combustible**

$$V_{CO_2} = n_1 \times \%CH_4 + n_2 \times \%C_2H_6 + n_3 \times \%C_3H_8 + n_4 \times \%C_4H_{10} + n_5 \times \%C_5H_{12}$$

Où :  $n_i$  sont les coefficients stœchiométrique du  $CO_2$  dans les réactions de combustion.

$$V_{CO_2} = 1.261 \text{ m}^3$$

**V.12.2 Le volume de  $H_2O$  contenu dans la fumée**

$$V_{H_2O} = n_1 \times \%CH_4 + n_2 \times \%C_2H_6 + n_3 \times \%C_3H_8 + n_4 \times \%C_4H_{10} + n_5 \times \%C_5H_{12}$$

Où :  $n_i$  sont les coefficients stœchiométrique du  $H_2O$  dans les réactions de combustion.

$$V_{H_2O} = 2.208 \text{ m}^3$$

**V.12.3 Le volume de O2 utilisé**

$$V'_{O_2} = [n_1 \times \%CH_4 + n_2 \times \%C_2H_6 + n_3 \times \%C_3H_8 + n_4 \times \%C_4H_{10} + n_5 \times \%C_5H_{12}] \times n$$

Où :  $n_i$  sont les coefficients stœchiométrique du O<sub>2</sub> dans les réactions de combustion.

Et :  $n = 1/\varphi$  (facteur de l'air)

$$n = 1,3$$

$$V'_{O_2} = 3.0745 \text{ m}^3$$

**V.12.4 Le volume de O2 contenu dans la fumée**

$$V_{O_2} = V'_{O_2}(n - 1)$$

$$V_{O_2} = 0.92235 \text{ m}^3$$

**V.12.5 Le volume de N2 contenu dans la fumée**

$$V_{N_2} = (0,79 * V_{O_2})/0,21$$

$$V_{N_2} = 11.5659762 \text{ m}^3$$

**V.12.6 Le volume total de la fumée**

$$V_f = V_{N_2} + V_{O_2} + V_{H_2O} + V_{CO_2}$$

$$V_f = 15.9573262 \text{ m}^3$$

**V.12.7 Le volume d'air utilisé**

$$V_{air} = V_{O_2} * 100/21$$

$$V_{air} = 14.6404762 \text{ m}^3$$

**V.12.8 La température de combustion (température de la flamme) [42]**

On a:  $CH_4 + 2O_2 \Rightarrow CO_2 + 2H_2O$

La variation d'enthalpie :

$$\Delta H_1 = \Delta_r H * x_F = -802,3 \text{ KJ}$$

$$\Delta H_2 = \int_{T_0}^{T_F} C_p(sf) dT$$

$sf$  : Système fermé

$$C_p = 2 * C_p(H_2O) + 1 * C_p(CO_2) + 8 * C_p(N_2)$$

$$C_p = 337.1 \text{ KJ}/K$$

$$\Delta H_2 = C_p(T_F - T_0)$$

$$\Delta H = 0 = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

$$\Delta H = \Delta_r H * x_F + C_p(T_F - T_0) = 0$$

$$T_F = T_0 - \frac{\Delta_r H * x_F}{C_p}$$

$$T_F = 2069 \text{ }^\circ\text{C}$$

### V.12.9 La température de la fumée à l'entrée du tube radiant [40]

$$T_{fe} = \frac{P_{cgn} * V_{ae} * T_{ae}}{V_{fe} * C_{pfe}}$$

$P_{cgn}$  : Pouvoir calorifique du gaz naturel.

$V_{ae}$  : Le volume d'air à l'entrée du tube radiant.

$T_{ae}$  : La température d'air à l'entrée du tube radiant.

$V_{fe}$  : Le volume de la fumée à l'entrée du tube radiant.

$C_{pfe}$  : La capacité calorifique de la fumée à l'entrée du tube radiant.

$$T_{fe} = 1219.92 \text{ }^\circ\text{C}$$

### V.12.10 La température de la fumée à la sortie du tube radiant [40 ,44]

$$T_{fs} = C_{pfe} * T_{fe} - \frac{(C_{pa_s} * T_{a_s} - C_{pa_e} * T_{a_e})}{V_f} * V_{air}$$

$C_{pa_s}$ : La capacité calorifique de l'air à la sortie du tube radiant.

$T_{a_s}$  : La température d'air à la sortie du tube radiant.

$C_{pa_e}$ : La capacité calorifique de l'air à l'entrée du tube radiant.

$$T_{fs} = 900.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Donc la chaleur perdue par les fumées sera

$$\phi_f = 21765.8292 \text{ KJ}$$

### V.13 Bilan thermique [40]

Le bilan thermique consiste à égaliser la somme des énergies en entrée à celles en sorties.

#### V.13.1 La chaleur en entrée

$$\sum \phi_{entrée} = \phi_{comb} + \phi_{pr}$$

$$\phi_{pr} = V_{air} * C_{p_{air}} * T_{air}$$

$V_{air}$ : Le volume d'air utilisé

$C_{p_{air}}$ : La chaleur spécifique de l'air à la température du préchauffage

$T_{air}$  : La température du préchauffage de l'air

$$\phi_{pr} = 15196.8143 \text{ KJ}$$

$$\phi_{comb} = PC_{gn} * q_{gn}$$

### V.13.2 La chaleur en sortie

$$\sum \phi_{sortie} = \phi_{ch} + \phi_{cr} + \phi_P + \phi_b + \phi_T + \phi_{atm} + \phi_f$$

$$\phi_{sortie} = 3444091.07 \text{ KJ}$$

A présent, égalisons  $\sum \phi_{sortie}$  et  $\sum \phi_{entrée}$

On a 
$$\sum \phi_{sortie} = \sum \phi_{entrée}$$

Soit 
$$\phi_{comb} = 3459287.88 \text{ KJ}$$

$$PC_{gn} * q_{gn} = 3444091.07 \text{ KJ}$$

**PCI du gaz naturel est :**

$$PC_{gn} = 42696,1301 \text{ KJ/m}^3$$

$$q_{gn} = 80.66 \text{ m}^3/\text{Traitement}$$

Sachant que la durée du traitement est de 5h [45]

Donc : le débit du gaz naturel par heure est :

$$q_{gn} = 16.13 \text{ m}^3/h$$

### V.13.3 Calcul du diamètre de la conduite d'entrée du gaz naturel [40]

$$q_{gn} = v_{gn} * \pi * \frac{D_{gn}^2}{4} * 3600$$

$q_{gn}$  : Débit du gaz naturel en (m<sup>3</sup>/h)

$v_{gn}$  : Vitesse d'écoulement du gaz naturel en (m/s)

$D_{gn}$  : Diamètre de la conduite du gaz naturel (mm)

$$D_{gn} = \left( \frac{4}{3600} * \frac{q_{gn}}{v_{gn} * \pi} \right)^{1/2}$$

$$q_{gn} = 16.13 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$v_{gn} = 10 \text{ m/s}$$

$$D_{gn} = 23.88 \text{ mm}$$

### V.13.4 Calcul du diamètre de la conduite d'entrée d'air [40]

$$D_{air} = \left( \frac{4}{3600} * \frac{q_{air}}{v_{air} * \pi} \right)^{1/2}$$

$q_{air}$  : Débit d'air en (m<sup>3</sup>/h)

$v_{air}$  : Vitesse d'écoulement d'air (m/s)

$D_{air}$  : Diamètre de la conduite d'air (mm)

$$q_{air} = 440,97 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$v_{air} = 10 \text{ m/s}$$

$$D_{air} = 124.88 \text{ mm}$$

### V.13.5 Calcul du diamètre d'évacuation de la fumée [40]

$$D_f = \left( \frac{4}{3600} * \frac{q_f}{v_f * \pi} \right)^{1/2}$$

$q_f$  : Débit de la fumée en (m<sup>3</sup>/h)

$v_f$  : Vitesse d'écoulement de la fumée (m/s)

$D_f$  : Diamètre de la conduite de la fumée (mm)

$$q_f = 480,63 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$v_f = 4 \text{ m/s}$$

$$D_f = 206.14 \text{ mm}$$

### V.13.6 Calcul du diamètre de la conduite d'entrée du gaz naturel dans le tube radiant [40]

$$d_{gn} = \left( \frac{4}{3600} * \frac{q_{gn}}{v_{gn} * 2 * \pi} \right)^{1/2}$$

$$d_{gn} = 16.89 \text{ mm}$$

### V.13.7 Calcul du diamètre de la conduite d'entrée de l'air dans le tube radiant [40]

$$d_{air} = \left( \frac{4}{3600} * \frac{q_{air}}{v_{air} * 2 * \pi} \right)^{1/2}$$

$$d_{air} = 88.3 \text{ mm}$$

### V.13.8 Calcul du diamètre de la conduite d'évacuation de la fumée dans le tube radiant [40]

$$d_f = \left( \frac{4}{3600} * \frac{q_f}{v_f * 2 * \pi} \right)^{1/2}$$

$$d_f = 145.76 \text{ mm}$$

### V.13.9 Calcul du diamètre de la buse du gaz naturel [40]

$$d_{bgn} = \left( \frac{4 * S_{bgn}}{\pi} \right)^{1/2}$$

$$S_{bgn} = \frac{\dot{q}_{gn}}{\rho_{gn} * v_{gn} * \varphi_{gn}}$$

$\rho_{gn}$  : Masse volumique du gaz naturel

$v_{gn}$  : vitesse du jet du gaz naturel

$\varphi_{gn}$  : Facteur de forme de la buse

$$\dot{q}_{gn} = \frac{q_{gn} * \rho_{0gn}}{3600}$$

$\dot{q}_{gn}$  : Quantité du gaz naturel débité par seconde

$q_{gn}$  : Débit du gaz naturel par tube radiant

$\rho_{0gn}$  : Densité du gaz naturel à 0°C

$$\rho_{gn} = \rho_{0gn} * \frac{T_0}{T_{gn}}$$

$$q_{gn} = \left( \frac{2 * \Delta P_{gn}}{\rho_{gn}} \right)^{1/2}$$

$$\Delta P_{gn} = P_{gn} - P_0$$

$P_{gn}$  : Pression du gaz naturel

$P_0$  : Pression atmosphérique

$$T_0 = 273 K \quad \text{et} \quad T_{gn} = 293 K$$

$$\Delta P_{gn} = 1.5 KPa$$

$$\rho_{0gn} = 0.9075 \text{ Kg}/m^3$$

$$\varphi_{gn} = 0.8 \quad (\text{Facteur de forme})$$

$$v_{gn} = 5 \text{ m}^3/h$$

Donc :

$$\rho_{gn} = 0.8313 \text{ Kg/m}^3$$

$$q_{gn} = 60,08 \text{ m/s}$$

$$\dot{q}_{gn} = 0.0015 \text{ Kg/s}$$

$$S_{b_{gn}} = 0.000451 \text{ m}^2$$

$$d_{b_{gn}} = 7.57 \text{ mm}$$

### V.13.10 Calcul du diamètre de la buse d'air [40]

$$d_{b_{air}} = \left( \frac{4 * S_{b_{air}}}{\pi} \right)^{1/2}$$

$$S_{b_{air}} = \frac{\dot{q}_{air}}{\rho_{air} * v_{air} * \varphi_{air}}$$

$\rho_{gn}$  : Masse volumique de l'air

$v_{air}$  : vitesse du jet de l'air

$\varphi_{gn}$  : Facteur de forme de la buse de l'air

$$\dot{q}_{air} = \frac{\dot{q}_{gn} * \rho_{0air} * q_{air}}{3600}$$

$\dot{q}_{air}$  : Quantité d'air débité par seconde

$q_{air}$  : Volume d'air par m<sup>3</sup> du gaz naturel

$\rho_{0air}$  : Densité de l'air à 0°C

$$\rho_{air} = \rho_{0air} * \frac{T_0}{T_{air}}$$

$$q_{air} = \left( \frac{2 * \Delta P_{air}}{\rho_{air}} \right)^{1/2}$$

$$\Delta P_{air} = P_{air} - P_0$$

$P_{air}$  : Pression de l'air

$P_0$  : Pression atmosphérique

$$T_0 = 273 K \quad \text{et} \quad T_{air} = 1023 K$$

$$\Delta P_{gn} = 1 KPa$$

$$\rho_{0air} = 1.293 \text{ Kg}/m^3$$

$$\varphi_{air} = 0.7 \quad (\text{Facteur de l'air})$$

$$q_{air} = 14.64 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \text{ du gaz naturel}$$

$$v_{gn} = 5 \text{ m}^3 / h$$

Donc :

$$\rho_{air} = 0.345 \text{ Kg}/m^3$$

$$q_{air} = 76.13 \text{ m}/s$$

$$\dot{q}_{air} = 0.024 \text{ Kg}/s$$

$$S_{b_{air}} = 0.00198 \text{ m}^2$$

$$d_{b_{air}} = 50 \text{ mm}$$

**V.14 Le rendement de la combustion [46]**

Le rendement de la combustion dépend du carburant, des conditions d'air dans lequel il est brûlé et de la température des fluides entrant et sortant du four.

$$\eta_{comb} = 100 - f(T_f - T_{amb})/\%CO_2$$

Où :

$f$  : Facteur dépend principalement du type de combustible (et pour le gaz naturel  $f=0.47$ )

$T_f$  : La température des fumées à la sortie du four [°C]

$T_{amb}$  : La température ambiante [°C]

$\%CO_2$  : La teneur en  $CO_2$  des fumées [%]

$$\%CO_2 = \%CO_{2max} * [21 - \%O_2]/21$$

Où :  $\%O_2$  : La teneur en oxygène mesurée dans les fumées [%]

$\%CO_{2max}$  : La teneur en  $CO_2$  des fumées (pour le gaz naturel;  $\%CO_{2max} = 11.9\%$ )

Donc :  $\eta_{comb} = 62\%$

Donc : l'énergie produite par le combustible sera :

$$\Phi_{comb} = 2144758.49 \text{ KJ}$$

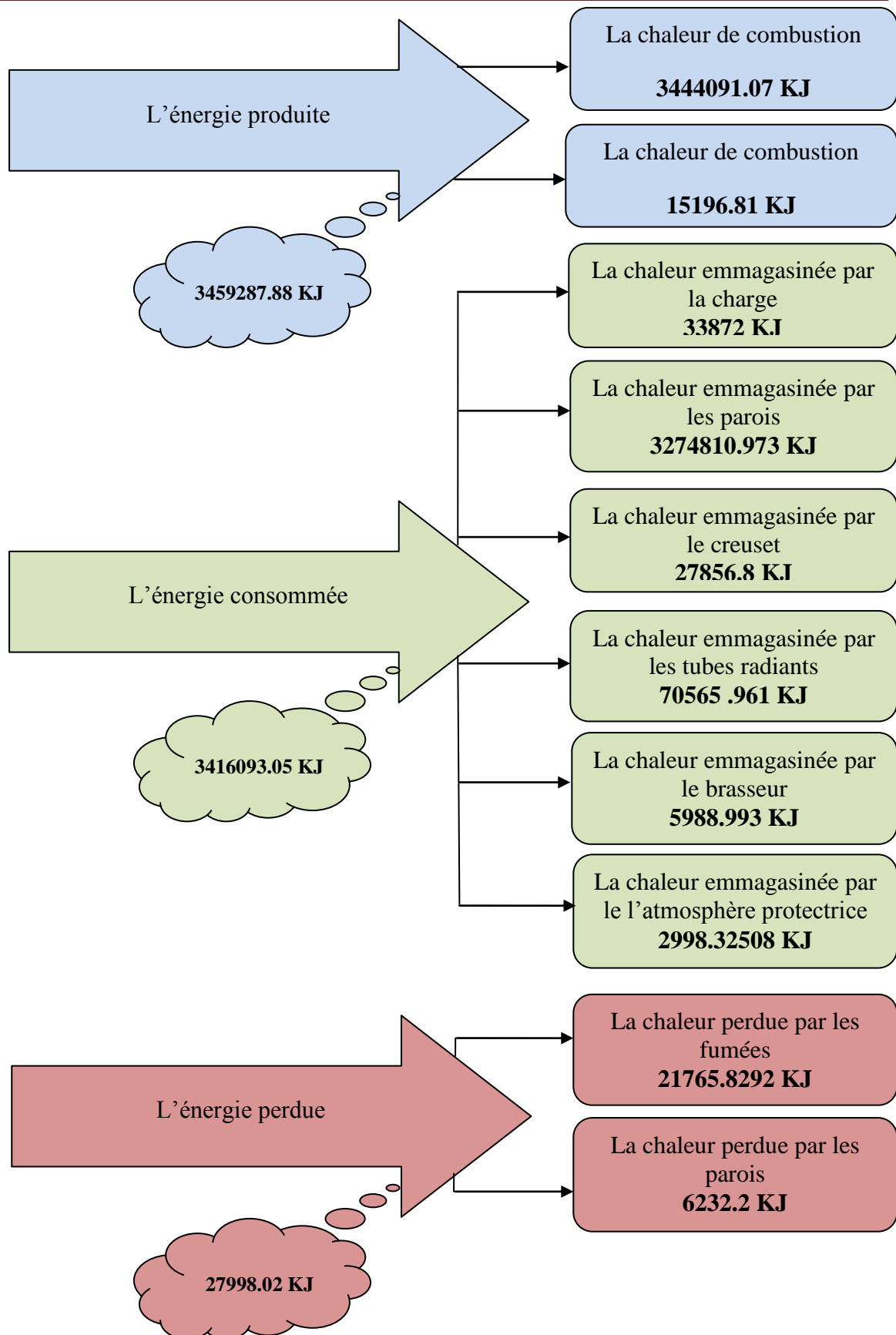


Figure 25: Le bilan thermique du four

Conclusion

Générale

### **CONCLUSION GENERALE**

Sans les fours, la production et l'utilisation de produits métalliques, tels que les cannettes en aluminium, à des fins diverses ne peuvent véritablement prospérer, sans repenser à la conception et à la réalisation des fours industriels avec des performances optimales.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au domaine de recherche des procédés de chauffage au gaz naturel. Notre objectif est de dimensionner un four discontinu, fonctionnant au gaz naturel, pour la n<sup>ème</sup> fusion de l'aluminium.

Le chauffage au gaz peut produire une densité de puissance élevée, permettant d'atteindre la température requise dans un court laps de temps et avec une économie d'énergie. Les fours à gaz représentent l'une des nombreuses applications dans l'industrie et dans notre vie quotidienne.

Le volume de charge à fusionner nous a permis de déterminer les dimensions du four à concevoir.

Nous avons choisi le creuset en graphite, l'utilisation des tubes radiants, et de l'atmosphère afin d'éviter une contamination de la charge à fusionner.

Afin de réduire au maximum les déperditions thermiques, il est nécessaire de choisir les matériaux pour l'isolation de faible capacité calorifique à haute température, et léger. Deux propositions de combinaison de parois ont été choisies. Les deux combinaisons de parois sont constituées de quatre couches d'isolation. La première combinaison est constituée de 0.065 m d'épaisseur de chamotte, 0.23 m d'épaisseur de briques réfractaires 2000, 0.15 m d'épaisseur de briques à feux 1200, et 0.002 m d'épaisseur d'acier. Cette combinaison a été rejetée par ce que la température de la paroi externe était de 181°C, ce qui représente un danger pour les opérateurs sur le four. La deuxième proposition de combinaison est constituée de 0.065 m d'épaisseur de chamotte, 0.23 m d'épaisseur de briques réfractaires 2000, 0.4 m d'épaisseur de laine de verre, et 0.002 m d'épaisseur d'acier. Cette combinaison a été acceptée par ce que la valeur de la température de la paroi externe était de 40°C, ce qui constitue pas de danger sur les opérateurs sur le four. Sachant aussi que la prolongation du temps d'utilisation du four montre que la 2<sup>ème</sup> combinaison est plus économique.

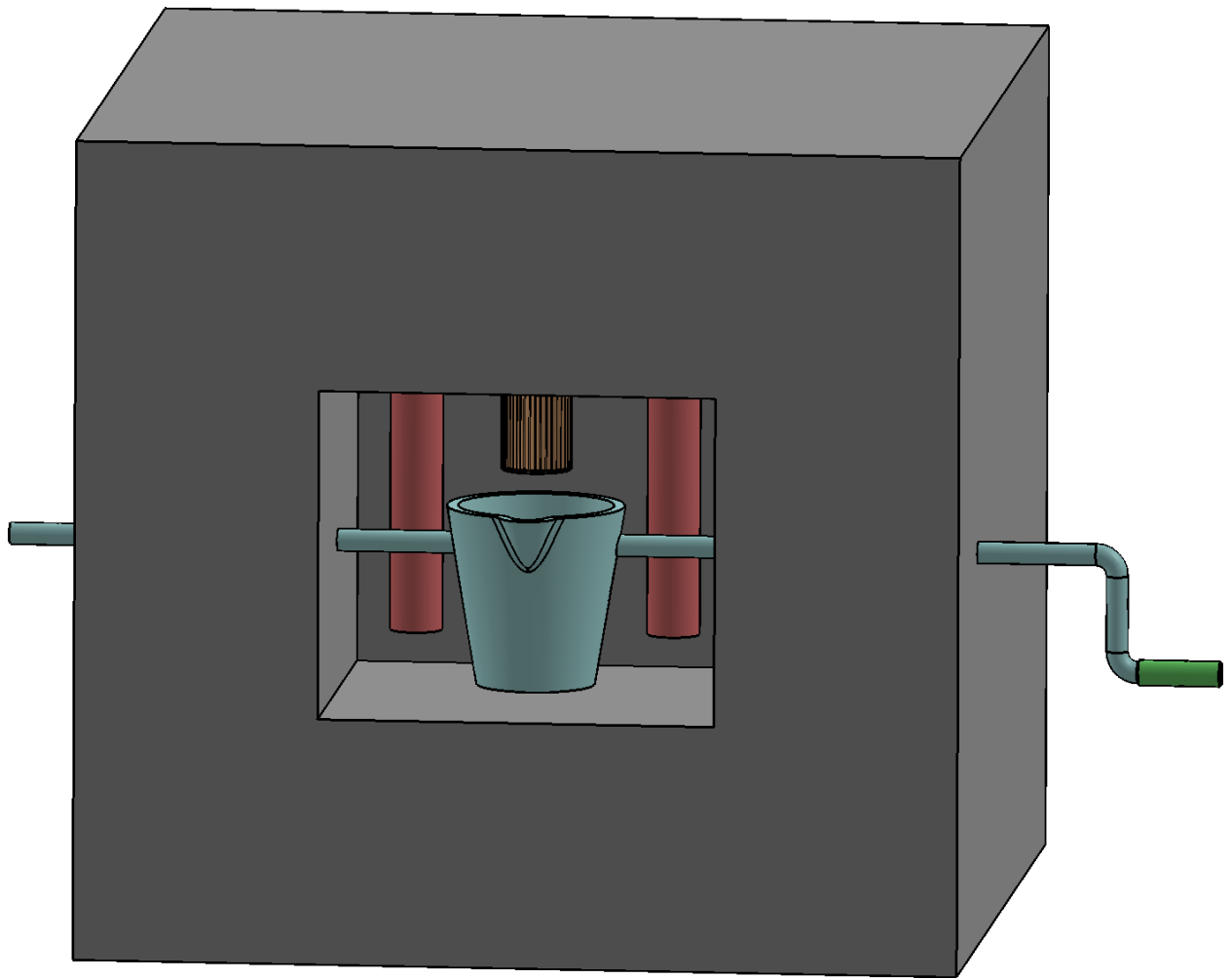
## CONCLUSION GENERALE

---

La détermination des températures des fumées à l'entrée et à la sortie des tubes radiants nous ont permis de faire le bilan thermique du four qui nous a permis à son tour de déterminer le débit du gaz naturel et de l'air apportés dans le four ainsi que la dimension de l'orifice d'entrée du gaz naturel et de l'air.

La chaleur générée par le fonctionnement du four, après récupération d'une partie pour le préchauffage de l'air, est libérée dans la nature dans les fumées. Par conséquent, ceux-ci sont encore chauds, ceci dit c'est encore une source d'énergie. Cependant, il est plus judicieux de récupérer cette énergie pour le chauffage de l'atelier de fusion.

Cette étude de conception est la première étape du projet de réalisation du four de fusion de l'aluminium. Enfin, nous espérons que notre recherche trouvera son application dans la pratique.



**Figure 26: Le schéma global du four**

## Bibliographie

- [1] Altnepoh/D. (1976). un regard à l'intérieur de l'aluminium, une introduction à la métallurgie et à la transformation de l'aluminium-ALUMINIUM. VERLAG-Paris.
- [2] Arrebola Bernet, J. J. (2015). Etude de structures en aluminium exposées en extérieur en lien avec le Musée de l'Histoire du fer. Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [3] LANDOLT, D. (1997). Corrosion et chimie de surfaces des métaux. Ed Press. Polytechniques et universitaires.
- [4] GREGOIRE, T. (2003). Traitements de surface et protections. Formation continue, stage GME.
- [5] CHRRIFI. (2010). Caractérisation d'un alliage d'aluminium et étude de sa forgeabilité. Aspects numériques et expérimentaux. UMMTO.
- [6]: Vargel, C. (1999). corrosion de l'aluminium. Paris: Edition: Dunod.
- [7] Ghali, E. (2010). Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys: understanding, performance, and testing (Vol. 12). John Wiley & Sons.
- [8] HADJI, H. &. (2020). EFFET DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LES PROPRIETES MECANIKES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM (Doctoral dissertation, Univ M'sila).
- [9] Kettih, S. (2013). Etude de l'effet du fromage fondu sur le comportement à la corrosion de papier d'emballage en aluminium. Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [10] katiyar, P. (2001). thesis processing, microstructural and mechanical characterization of mechanically alloyed Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites.
- [11] <http://aluminium.hot.lu/alumine>.
- [12] <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/F/Alumine.HTML>,
- [13] <https://www.youtube.com/watch?v=EXwGcxGuVd4&feature=share>. (s.d.). Récupéré sur Comment c'est fait canette aluminium.
- [14] Brault-Vattier, T. P. (2015). L'aluminium au XXe et XXIe siècles. Étude d'économie industrielle. (Doctoral dissertation, Pau).
- [15] P.G, S. (1960). 'Induction heating: coil and system design' McGraw-Hill company.
- [16] ETSU. (2000). 'Efficient melting in coreless induction furnaces' Energy Efficiency Best Practice Programme, Harwell, Didcot.
- [17] G, D. (2000). 'Chauffage par induction électromagnétique : principes' Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique.
- [18] GUIBET, J. (2011). Carburants liquides, Caractéristiques et principes généraux. Montagne X .
- [19] Perthuis, E. Combustion industrielle. Technip-paris: ISBN 2-7108-0438-7, pp 215.

## Bibliographie

- [20] al, J.-F. B. (Février 2005). Fours électriques à résistances – Présentation générale, technique de l'ingénieur.
- [21] Pachón-Morales, J. C. (2017, July). Influence de l'épaisseur de particule sur l'homogénéité de traitement thermique d'un bois de peuplier. In 16<sup>ème</sup> Congrès de la Société Française de Génie des Procédés.
- [22] Pierce, C. (2001.). 'Progress-variable Approach for Large-eddy Simulation of Turbulent Combustion', PhD. Stanford University.
- [23] E.J Mittemeijer, J. S. (1996). 'Chemical potentials and activities of nitrogen And carbon imposed by gaseous nitriding and carburizing atmospheres'. Surf. Eng.12(2).
- [24] Schluuter, J. (2002). 'Consistent Boundary Conditions for Integrated LES/RANS Simulations: LES Inflow Conditions', Annual Research Briefs, Center for Turbulence Research, pp. 143 - 154 .
- [25] BIDAULT, F. ( 2007). Thèse doctorat « animation et rendu temps-réel de flammes».
- [26] «www.google les images de la combustion et la flamme ». (s.d.).
- [27] Perthuis, E. (1983). Combustion industrielle. Editions OPHRYS.
- [28] Introduction aux combustibles et à la combustion. Technique et Documentation. (1978). PARIS.
- [29] Fethi, B. (2006). Memeoire Magister Simulation numerique de la combustion non prémélangés par la methode(LES).
- [30] S. Cheol Ko and H. Jin Sung. (2002). 'Large-Scale Turbulent Vortical Structures Inside a Sudden Expansion Cylinder Chamber', Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 68, pp. 269 - 287, . Kluwer Academic Publishers.
- [31] delicat, Y. G. (2012). Thèse doctorat « étude de la réactivité de l'iode transporté dans un mélange H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O en conditions de combustion dans des flammes basse pression prémélangées».
- [32] Mémoire présente en vue de l'obtention du diplôme de magistère « étude numérique et expérimente de la flamme non-prémélangée », . (2009).
- [33] E.J Mittemeijer, J. S. (1996). Chemical potentials and activities of nitrogen And carbon imposed by gaseous nitriding and carburizing atmospheres'. Surf. Eng.12(2).
- [34] khechba, M. (2008). thèse de magistère. Université de Constantine.
- [35] Thermique appliquée aux fours industriels.
- [36] Transmission de Chaleur et Thermodynamique .
- [37] Initiation aux transferts thermiques.
- [38] [https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property\\_tables/gas/idealGas.html](https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property_tables/gas/idealGas.html)
- [39] R.HOFFMANN, K.WEISSOHN, Le rôle des sondes à oxygène dans la nitruration et la nitrocarburation ; Trait. Therm., no 267 (1993)

## Bibliographie

- [40] N.ZAZI, Conception d'un four industriel à gaz pour le traitement thermique des roulements à billes (Juin 1989)
- [41] A.KATARGUINE, G.KLIAGUINE, V.TGHELNOKOV, I.BOBOUKH ,Calcul des fours métallurgiques; Annaba (1975)
- [42] <https://www.pdfprof.com/>
- [43] [hal.univ-lorraine.fr](http://hal.univ-lorraine.fr)
- [44] A.BOUDEFOUA, M.HOSNI, Simulation numérique d'un échangeur eau/sol Couplé à un échangeur eau/air;UMMTO (2012)
- [45] <https://metalblog.ctif.com/2018/09/17/effet-du-traitement-thermique-sur-un-aluminium-alsi7mg/>
- [46] <https://energieplus-lesite.be/mesures/chauffage7/mesurer-le-rendement-de-combustion/>

## ***Résumé***

Dans cette étude on s'intéresse à concevoir un four à gaz pour la fusion des canettes en aluminium récupérés de la nature, cette conception est réalisée à partir de la dimension d'une charge de 50 kg de canettes d'aluminium. Le choix des couches de parois d'isolation du four, la voûte, et la sole a été faite sur la base des matériaux existant dans le marché. Une partie de l'énergie transportée par les fumées est utilisée pour le préchauffage de l'air constituant le comburant. Les énergies constituant les composants du four, la charge et l'atmosphère contrôlée du four ont été calculées. A partir de là le débit du combustible et du comburant ont été déterminés ainsi que le diamètre de l'orifice d'injection du gaz naturel et de l'air. Deux propositions de parois ont été présentées pour montrer le choix des matériaux constituant les parois. Le rendement de combustion a été déterminé pour prévoir le débit réel du combustible.

**Mots clés:** Fours, Gaz naturel, Combustion, Aluminium, Transfert thermique.

## **Abstract**

In this study we are interested in designing a gas furnace for melting aluminum cans recovered from nature; this design is made from the size of a load of 50 kg of aluminum cans. The choice of the insulation wall layers of the furnace, the vault, and the floor was made on the basis of the materials existing in the market. Part of the energy carried by the fumes is used to preheat the air constituting the oxidizer. The energies constituting the furnace components, the load and the controlled atmosphere of the furnace were calculated. From this, the fuel and oxidizer flow rates were determined as well as the diameter of the natural gas and air injection port. Two wall proposals were presented to show the choice of wall materials. The combustion efficiency was determined to predict the real fuel flow rate.

**Keywords:** Furnaces, Natural gas, Combustion, Aluminum, Heat transfer.